



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

# **ODLOUČENÍ DOPRAVNÍHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU SUROVINOVÉ MOUČKY**

SEVERANCE OF RAW MATERIAL FLOUR TRANSPORTATION AIR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. LUKÁŠ BRZOBOHATÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR  
BRNO 2013

**doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lukáš Brzobohatý

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Odloučení dopravního vzduchu surovinové moučky**

v anglickém jazyce:

### **Severance of raw material flour transportation air**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je technicko-ekonomická analýza dopadu odloučení dopravního vzduchu surovinové moučky na ekonomiku procesu výroby cementu resp. slínku.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je provést analýzu vlivu odloučení dopravního vzduchu surovinové moučky na ekonomiku výroby slínku resp. cementu v cementárně. Formou technicko-ekonomické analýzy budou v konkrétní cementářské výrobě posouzeny technické a ekonomické dopady spojené s uvedenou úpravou technologie dopravy surovinové moučky do systému jejího předeřevu.

Seznam odborné literatury:

- [1] COULSON J. and RICHARDSON J. (1999) Chemical Engineering, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK, 6th edn.
- [2] HEWITT G., SHIRES G. and BOTT T. (1994) Process Heat Transfer, CRC Press, LLC, Boca Raton,

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 23.11.2012 17:53

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Brzobohatý Lukáš: Odloučení dopravního množství vzduchu surovinové moučky.

---

Práce je zaměřena na provedení technicko - ekonomické analýzy vlivu odloučení dopravního množství vzduchu surovinové moučky na ekonomiku výroby slínku resp. cementu v konkrétní cementářské výrobě. Analýza je provedena na základě detailního poznání a rozboru funkce jednotlivých částí technologie výroby cementu, které jsou odloučením dopravního vzduchu surovinové moučky ovlivněny, tj. především systém dávkování a přehřevu surovinové moučky. Výsledky provedené analýzy ukazují významný efekt (dopad) odloučení dopravního vzduchu na ekonomiku provozu.

Klíčová slova: surovinová moučka, dopravní vzduch, výroba cementu, slínek, výměna tepla

## **ABSTRACT**

Brzobohatý Lukáš: Severance of raw material flour transportation air.

---

The dissertation is focused on the applied technical and economic analysis of the influence separation of transport air from raw meal on the economy clinker/cement production, in specific cement production. The analysis is performed on the basis of a detailed understanding and analysis of the function of each component of the technology of cement production, which are affected by separation of transport air from raw meal, mainly the dosing and preheat system of the raw meal. The results of the analysis show a significant effect (impact) separation of transport air on the production costs.

Key words: raw meal, transport air, cement production, clinker, heat exchange

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BRZOBOHATÝ, L. *Odloučení dopravního vzduchu surovinové moučky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D..

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Mokrém dne 24.5.2013

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Zdeňkovi Jeglovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2 TECHNOLOGIE VÝROBY CEMENTU.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Technologické schéma výroby cementu.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Těžba a drcení suroviny.....	12
2.1.2 Výroba surovinové moučky.....	13
2.1.3 Výpal portlandského slínku.....	14
2.1.4 Mletí cementu.....	14
2.1.5 Expedice cementu.....	14
2.1.6 Kontrola kvality a centrální řízení výroby.....	15
<b>3 OCHRANA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Ochrana a šetření zdrojů.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Úspora surovin.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Úspora energie.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Úspora paliva.....</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Vliv prašnosti.....</b>	<b>18</b>
<b>4 VÝMĚNA TEPLA V PROCESU VÝROBY CEMENTU.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Obecná klasifikace výměníků tepla.....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Rozdělení dle způsobu předání tepelné energie.....	19
4.1.2 Rozdělení dle konstrukce - rekuperační výměníky.....	21
4.1.3 Rozdělení dle konstrukce - regenerační výměníky.....	23
<b>4.2 Zařízení pro přehřev a kalcinaci práškové cementářské suroviny.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 Systém přehřevu surovinové moučky.....</b>	<b>29</b>
4.3.1 Kalcinační kanál KKN.....	29
4.3.2 Kalcinační komora SCC.....	30
4.3.3 Rotační pec.....	31
4.3.4 Terciální vzduchovod.....	32
<b>5 ŘEŠENÍ ODLOUČENÍ DOPRAVNÍHO MNOŽSTVÍ</b>	
<b>VZDUCHU SUROVINOVÉ MOUČKY .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Dávkování surovinové moučky.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Prostup surovinové moučky cyklónovým výměníkem.....</b>	<b>36</b>
5.2.1 Zaústění potrubí do hadicového filtru na „58m“.....	37
5.2.2 Hadicový filtr „na 58m“.....	38
5.2.3 Ventilátor filtru „na 58m“.....	42



5.2.4 Kouřový (pecní) ventilátor.....	43
<b>5.3 Výpočet úspor za elektrickou energii a tepla při odloučení dopravního množství vzduchu.....</b>	<b>44</b>
5.3.1 Úspora za elektrickou energii s ventilátorem filtru „na 58m“.....	44
5.3.2 Úspora za elektrickou energii bez použití ventilátoru filtru „na 58m“....	47
5.3.3 Úspora na černém uhlí.....	49
<b>5.4 Možnost náhrady pneumatické dopravy surovinové moučky do výměníku a homogenizačních sil dopravou mechanickou.....</b>	<b>52</b>
<b>6 ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

# 1 ÚVOD

Společnosti Českomoravský cement, Českomoravský beton a Českomoravský štěrtek patří mezi přední výrobce cementu, transport betonu a kameniva na území České republiky. Tyto tři společnosti jsou součástí silné mezinárodní skupiny Heidelbergcement, která je jedním z nejvýznamnějších světových dodavatelů stavebních materiálů. Českomoravský cement, Českomoravský beton a Českomoravský štěrtek kombinují své dlouhodobé zkušenosti a znalosti podmínek místního trhu s vysokou profesionalitou a stabilním zázemím skupiny Heidelbergcement a svou vzájemnou spoluprací tak mohou soustavně zvyšovat kvalitu svých produktů a služeb.

Společnost Českomoravský cement, a.s., nástupnická společnost je největším výrobcem cementu v České republice. V současné době vyrábí cement ve dvou cementárnách: v Mokré u Brna a v Praze-Radotíně. V cementárně Králův Dvůr byla výroba cementu začátkem roku 2003 dočasně přerušena a dnes je zde v provozu moderní balicí linka a expedice baleného i volně loženého cementu.



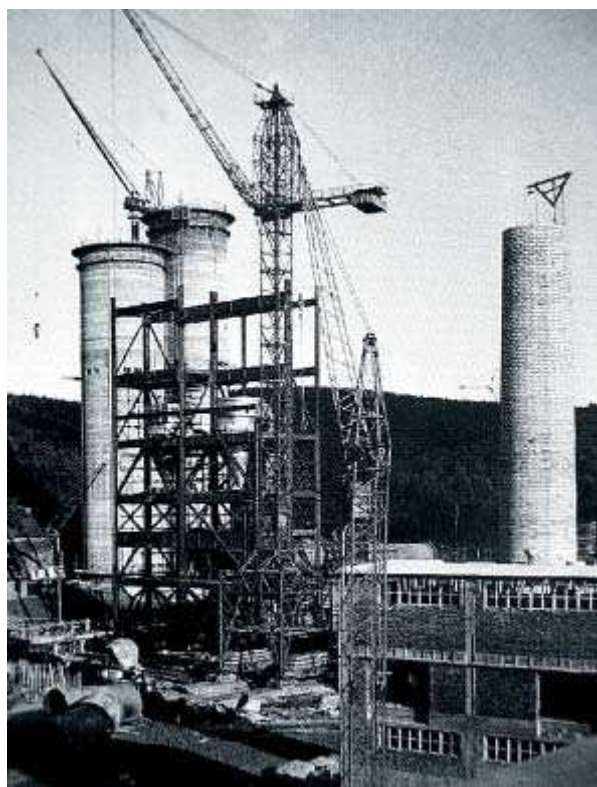
Obr. 1 Letecký současný snímek Cementárny v Mokré [8]

Rozvoj vápenického a později i cementářského průmyslu v brněnském regionu má dlouholetou tradici neboť předměstí Brna leží na jihu velkého ložiska vápenců. Přímo v okolí Brna bylo vybudováno koncem 19. století několik vápenek. Kruhové pece pod Bílou Horou, pod Stránskou skálou v Juliánově a severně od obce Líšeň na Hádech. Šachtové pece byly postaveny v Ochozu pod kopcem pod Žernávkou v obci Mokrá pod Mokerským lesem a na severu u obce Šošůvka. Roku 1907 byla v Maloměřicích postavena cementárna s rotačními pecemi na výpal slínku mokrým způsobem. V letech 1961 - 1968 byl vybudován nový závod v Mokré, který vyrábí cement a vápno. Leží asi 15 km východně od Brna a je umístěn v zalesněné krajině mimo zemědělskou oblast (viz obr.1). V letech 1957 - 1959 byla vypracována studie stavby s pěti různými alternativami. V březnu a květnu 1961 byly předloženy a schváleny zadávací projekty. V květnu 1961 byly zahájeny stavební práce na

příjezdových komunikacích do závodu, začala výstavby akumulčních nádraží v údolí Říčky, úprava nádraží v Blažovicích a otvírkové práce v lomu. Začátek roku 1963 byla pro nedostatek investičních prostředků celá stavba zastavena. V roce 1965 byla stavba zařazena mezi přednostně realizované akce a byl vytvořen národní podnik s názvem cementárna Mokrá.

V říjnu roku 1968 byly uvedeny do provozu pecní linky na výpal slínku. Ve druhém pololetí 1969 byl zahájen provoz rotačních pecí na výpal vápna a mlýnu na mletí cementu. V roce 1980 vznikl v Mokré koncernový podnik Cementárny a vápenky. V lednu 1990 byl založen samostatný státní podnik Cementárny a vápenky Mokrá. V lednu 1991 vznikla akciová společnost Cementárny a vápenky Mokrá, která byla v prosinci téhož roku privatizována.[8]

Majoritním akcionářem se stala belgická společnost CBR. V květnu 1998 byly sloučeny akciové společnosti Cementárny a vápenky Mokrá a Cement Bohemia Praha do nové společnosti pod názvem Českomoravský cement. Společnost je členem skupiny Heidelberg Cement, jednoho z největších světových koncernů působících v oboru výroby stavebních hmot. Obr. 2 ilustruje historii výroby cementárny [8]



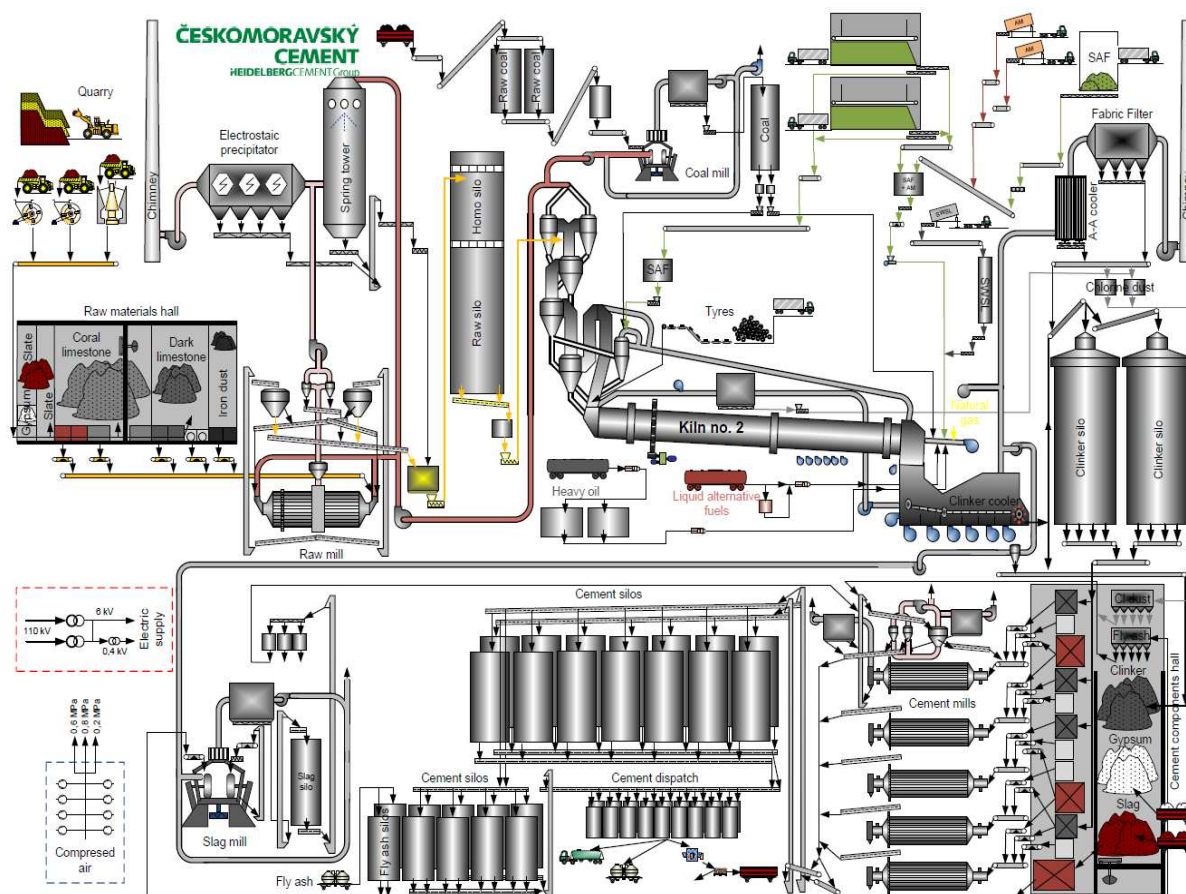
Obr. 2 Dokumentace stavby cementárny v Mokré [8]



## 2 TECHNOLOGIE VÝROBY CEMENTU

### 2.1 Technologické schéma výroby cementu

Na následujícím obr. 3 je přehledně znázorněna technologie výroby cementu v Cementárně Mokrá od těžby vápence až po samotnou výrobu cementu. V následujících kapitolách budou jednotlivé fáze výroby cementu blíže představeny.



Obr 3. Technologické schéma výroby cementu [9]

#### 2.1.1 Těžba a drcení suroviny

Technologie výroby cementu v závodě Mokrá začíná těžbou vápenců a korekčních břidlic v lomu, vzdáleném 2 km od základního závodu.



Obr 4. Nakládání a odvoz vápence z Lomu v Mokré

Dobývání těchto surovin se provádí pomocí clonových odstřelů. Jeho momentální těžební rozloha je 120 ha při roční přibližné těžbě 1.500 000 tun. Doprava a nakládání suroviny z jednotlivých těžebních prostor k drcení je zajišťována kolovými nakladači a vysokotonážními vozy Caterpillar, Komatsu. Surovina je drcena ve 2 kladivových drtičích Macrum a dopravována pásovými dopravníky na skládku suroviny do základního závodu pro další zpracování ve výrobní technologii.



Obr. 5 Clonové odstřely



Obr. 6 Kladivový drtič

### 2.1.2 Výroba surovinové moučky

Ze skládky se dopravuje již podrcená surovina včetně potřebného množství korekční složky do oběhových surovinových mlýnů, kde je mleta a sušena. Rozemletá surovina postupuje přes homogenizační sila do zásobních sil. V průběhu celého výrobního postupu jsou prováděny zkoušky, na jejichž základě lze složení suroviny upravit.



Obr. 7 Homogenizační sila



### 2.1.3 Výpal portlandského slínku

Nejdůležitějším procesem výroby cementu je výpal slínku. Surovinová moučka prochází cyklovým výměníkem, kde dochází k přehřátí suroviny na teplotu 850°C, do rotační pece. Ve výměníku dochází k využití tepla kouřových plynů a k dokonalému zachycení oxidu siřičitého který se přemění na neškodný síran vápenatý. Pálením na mez slnutí (cca 1 450°C) se tvoří umělé, tzv. slínkové minerály, které se následným prudkým ochlazením v chladiči stabilizují a vzniká slínek.

Jak už bylo řečeno, nejdůležitějším procesem výroby cementu je výpal slínku, kdy surovinová moučka prochází cyklovým výměníkem do rotační pece. Proto bude tato problematika řešena v samostatné kapitole 5, kde bude diskutována i problematika samotného odloučení dopravního množství vzduchu.

### 2.1.4 Mletí cementu

Ze slínkového sila se slínek odebírá pro mletí v oběhových cementových mlýnech, kde se mele společně s regulátorem tuhnutí (chemosádrovec, energosádrovec), případně dalšími složkami (struskou, popílkem, odprašky apod.) na jemný prášek – cement.

Hotový cement je skladován v cementových silech a po přezkoušení kvality se uvolňuje k expedici.



Obr. 8 Rotační kulový mlýn

### 2.1.5 Expedice cementu

Cement se expeduje jako volně ložený v autocisternách nebo ve speciálních železničních vagónech nebo také balený v papírových pytlích. Naplněné pytle postupují z baličky na paletizační linku, kde jsou ukládány na dřevěné palety. Paletovaný cement (s fólií i bez) se expeduje na nákladních autech nebo v železničních vagónech.



Obr. 9 Paletizační linka

### **2.1.6 Kontrola kvality a centrální řízení výroby**

Kontrolu a řízení jakosti provádí laboratoř, vybavená moderní chemickou a fyzikálně mechanickou zkušebnou. Laboratorní zkoušky se nevztahují jen na zkoušení hotového výrobku, ale zahrnují také rozborů všech vstupních surovin a meziproductů, lomem počínaje a expedicí konče. Cementárna je plně automatizována.

Celá výroba je řízena z centrálního velínu pomocí výpočetní techniky. Technologické procesy a produkty závodu se mohou pochlubit tou nejvyšší kvalitou, která je potvrzena certifikátem dokládajícím shodu systému řízení jakosti pro proces výroby a dodávání s normou ČSN EN ISO 9001:2001.



Obr. 10 Centrální velín

### 3 OCHRANA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Cementárna je ze zákona povinná dbát na ochranu životního prostředí. Veškeré odpadní látky a plyny jsou měřeny a vyhodnocovány a nesmějí přesahovat určené emisní limity. Měří se prašnost, složení vyprodukovaných plynů např: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, hlučnost a jiné parametry. Ve všech závodech akciové společnosti, tedy i v Cementárně Mokrá, je zaveden systém environmentálního řízení dle ČSN EN ISO 14 001.



Obr. 11 Kontinuální měření emisí

#### 3.1 Ochrana a šetření zdrojů

Aby v závodech Cementárna Mokrá nezatěžovali životní prostředí, sází na odpovědné zacházení s přírodními zdroji. Ve stále větší míře jsou suroviny jako přírodní vápenec a paliva (zemní plyn, těžký topný olej, uhlí) nahrazovány vhodnými materiály, které jsou v jiných průmyslových odvětvích odpadem. Tímto se šetří nejen zdroje z vlastního lomu, ale i všude tam, kde musí být získávány ostatní suroviny a paliva. Kromě toho nemusí být tyto odpady likvidovány ve speciálních zařízeních nebo na skládkách. Tímto cementárna plní úkoly cyklického hospodářství.

#### 3.2 Úspora surovin

K výrobě cementového slínku, základu pro všechny druhy cementu, jsou zapotřebí čtyři hlavní složky: [9]

- a) oxid vápníku
- b) oxid křemíku
- c) oxid hliníku
- d) oxid železa

Pro zaručení vysoké kvality slínku musí být tyto materiály smíchány v určitém poměru. Podle analýzy kamene z kamenolomu Mokrá se stanoví procentuální podíl z těžených etází tak, aby namletá surovinová moučka, vstupující jako surovina do rotační pece, splňovala podmínky pro výpal kvalitního slínku.

Těží se tři druhy materiálu: vysokoprocenní vápenec, nízkoprocenní vápenec, břidla.

Pro šetření přírodních surovin používáme následující náhradní suroviny:

- při výrobě slínku se používají jako náhrada za oxid železa kyzy (odpad s vysokým obsahem oxidu železa z výroby železa a oceli) a ocelové kostry ze starých pneumatik,



- při výrobě cementu nahrazuje vysokopecní granulovanou strusku (odpad vznikající při výrobě železa) a popílek s velmi vysokým podílem oxidu hliníku (odpad z uhelných elektráren) přírodní surovinu vápenec, ze kterého je vyráběn slínek,
- jako regulátor tuhnutí cementu je nahrazen přírodní sádrovec energosádrovcem a chemosádrovcem (vápenná drť z čističe spalin),
- spalitelné odpady jsou stále ve větší míře využívány jako alternativní paliva.

### 3.3 Úspora energie

Výroba cementu je velice energeticky náročná. Z tohoto důvodu se stále více využívají náhradní zdroje paliv. Tepelná energie se získává z recyklovaných zdrojů a je snaha o úsporu elektrické energie a její maximální odběr mimo špičky (např: při mletí cementu). Procentuální rozložení výroby elektrické energie v Cementárně Mokrá za rok 2004 ilustruje tabulka 1.

Tabulka č.1 Rozdělení spotřeby elektrické energie ve výrobním procesu [9]

%	2004
těžba	0,09
drcení	2,08
mletí suroviny	22,54
výpal slínku	19,84
sušení strusky	0,57
mletí cementu	44,94
expedice	1,23
ostatní	8,7

### 3.4 Úspora paliva

Tisíce tun paliv potřebuje každoročně výrobní závod k výpalu slínku. Úsporou primárních paliv (zemního plynu, topného oleje a uhlí) přispívají k šetřenému zacházení s přírodními zdroji a současně napomáhají ke snižování množství vylučovaných škodlivin.

Značná úspora hlavních paliv je dosažena (jak ilustruje tabulka 2) spalováním vyřazených ojetých pneumatik jak celých, tak drcených. V závodě je od roku 1983 provozováno technologické zařízení pro dopravu těchto pneumatik přímo do rotačních slínkových pecí.

Tabulka č.2 Spotřeba paliv pro výrobu slínku [9]

Další zastoupení jako alternativní palivo v rotačních slínkových pecích mají některé hořlavé kapalné odpady, jako jsou upotřebené oleje, rozpouštědla, surový lehký olej (SLO), surový generátorový dehet (HGD) a řada dalších kapalných odpadů ze zpracování ropy a uhlí. K tomuto účelu je vybudováno samostatné stáčení zařízení zabezpečené proti úniku ropných látek. Rozvody jsou přímo napojeny na hořáky rotačních pecí.

Na začátku roku 2001 byl těžký ropný olej nahrazen novým palivem, uhlím ze směsi černého uhlí a KORMULU (kaly, které vznikají při kyselé rafinaci ropy, které byly dříve ukládány v tzv kalových rybnících a představovali značnou ekologickou zátěž).

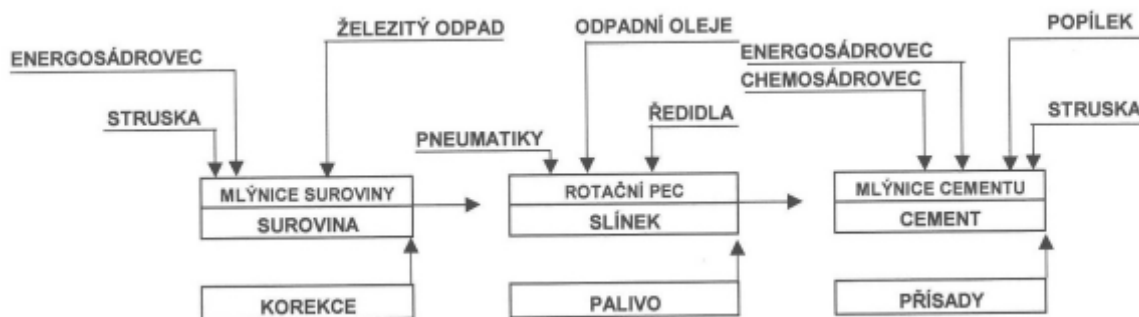
V současné době se dokončuje investiční akce na likvidaci dalších tuhých odpadů (odpadové dřevo, odpad z textilního a kožedělného průmyslu,

%	2001	2004
Plyn	0,07	5,33
Uhlí	13,81	37,95
Kormul	1,36	4
TTO	38,40	0,38
HGD	16,49	13,95
AP oleje	0,21	0
OXO-ZPO	4,93	6,49
SLO-OSB	9,83	4,38
AROL	0,14	0,12
Pneu	13,61	13,28
TAP	1,15	9,17
MKM	0	4,95
Alternativní paliva celkem	47,72	56,34

odpadní plasty). Při spalování těchto odpadů dochází k jejich bezpečné likvidaci a k následnému využití jejich energetického obsahu. Vysoká teplota plamene 2100 °C v rotační peci a dlouhá doba zdržení hořícího paliva v pásmu teplot nad 1200°C (2-5 vteřin), zaručuje dokonalé spálení. Tabulka č.3 ukazuje rozdíl využití spotřeby paliv roku 2012 oproti roku 2001 a 2004, kdy je snaha o snížení od nenahraditelných zdrojů a přechod na tuhé alternativní paliva, pneudrt', čistírenské kaly apod.

Tabulka č.3 Spotřeba paliv pro výrobu slínku 2012 [9]

%	RPS2 -2012
plyn	0,05
uhlí	23,24
kormul	0
TTO	0
HGD	1,75
AP oleje	0,07
OXO-ZPO	nedostupné
SLO-OSB	nedostupné
AROL	nedostupné
Pneu	13,59
TAP	57,72
MKM	0,31
pneudrt'	1,38
čistír.kaly	1,88
AP celkem	76,7



Obr. 12 Schéma využívání odpadních materiálů [9]

### 3.5 Vliv prašnosti

Hlavní aktivity společnosti v oblasti ochrany životního prostředí jsou zaměřeny na snižování tuhých emisí v ovzduší, včetně snižování sekundární prašnosti. V této oblasti je značná část investic vkládána do ekologických projektů.

Bylo realizováno umístění nových odprašovacích zařízení v lomu, v dopravních cestách surovin a ve výpalu slínku. Byla provedena výměna odlučovacích zařízení výroby v expedici cementu. V závodě je nainstalováno 50 odlučovacích zařízení. Výrazně snížila podíl úletů tuhých znečišťujících látek do ovzduší.

Účinnost nových zařízení je velmi vysoká a pohybuje se okolo 99,9 %. Pravidelně je zjišťováno měření emisí ze zdrojů znečišťování ovzduší. Kontinuální emisní monitoring je vybudován na hlavních výrobních agregátech to je rotačních pecích a mlecích zařízeních.

## 4 VÝMĚNA TEPLA V PROCESU VÝROBY CEMENTU

Přenos tepelné energie na vytápění, technologický ohřev nebo na výrobu elektrické energie se obecně odehrává v zařízeních, které nazýváme výměníky tepla. Jsou to zařízení pro uskutečnění kontinuálního, nebo přerušovaného přenosu tepelné energie mezi dvěma nebo více proudícími teplotnosnými médii. Dochází zde k předávání tepla z teplého (ohřívacího) média do média chladnějšího (ohřívajícího). Charakteristickým rysem výměníků tepla používaných v procesu výroby cementu je omezení pracovních médií převážně na vodu, vodní páru, vzduch a spaliny.

Tepelné výměníky mají mnoho možností využití, přičemž se v procesu výroby cementu lze nejčastěji setkat s těmito aplikacemi:

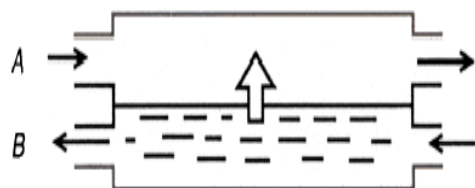
- ohřev pracovní látky - jedná se především o ohřev vody a ohřev vzduchu parou, horkou vodou nebo spalinami
- chlazení pracovní látky - jedná se o snížení teploty pracovní látky
- kondenzace páry - účelem je zkapalnění páry, přičemž odvedené teplo bývá obvykle ztrátovým teplem
- předehřev pracovní látky
- využití odpadního tepla
- výroba páry

### 4.1 Obecná klasifikace výměníků tepla

#### 4.1.1 Rozdělení dle způsobu předání tepelné energie

##### ➤ Rekuperační výměníky tepla

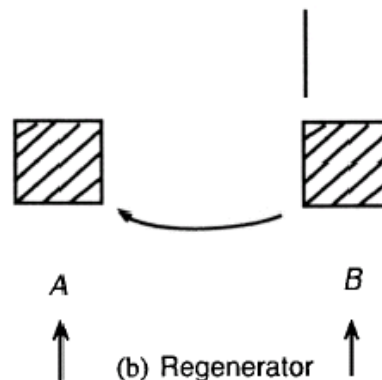
Konvenční výměník tepla, jak je schematicky znázorněno na obr.12, s přenosem tepla mezi dvěma kapalnými proudy, se nazývá rekuperátor, protože studený proud A využívá část tepla, který je obsaženo v horkém proudě B. Přenos tepla je kontinuální, přes pevné rozhraní (stěnu) zeď oddělující proudy (viz obr.12). [1]



Obr. 12 Rekuperační výměna tepla [1]

##### ➤ Regenerační výměníky tepla

V regenerátoru (nebo regeneračním výměníku tepla) je oproti rekuperátoru přenosu tepla dosaženo přerušovaným způsobem pomocí tělesa absorbujícího teplo (obvykle pevného složení), které se periodicky pohybuje mezi teplými a studenými proudy. Tento cyklický princip je znázorněn na obrázku. Zatímco pevná látka je ve studeném proudě A, ztrácí teplo, když je v horkém proudě B, získává teplo. To znamená, že se regeneruje. [1]



Obr. 13 Regenerační výměna tepla [1]

### ➤ Přenos tepla přímým kontaktem

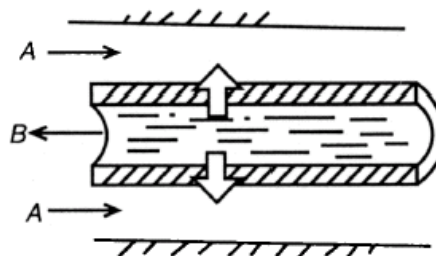
Při výměně tepla přímým kontaktem nejsou fyzicky přítomny stěny mezi teplými a studenými proudy. Místo toho dvě tekutiny dochází do přímého styku, který tvoří přirozené rozhraní, přes které je teplo přeneseno (viz schematické znázornění na obr.14). Tyto tekutiny jsou nejčastěji typu plyn-kapalina, dvě nemísitelné kapaliny, nebo kombinace pevné částice - kapalina.



Obr. 14 Přenos tepla s přímým kontaktem [1]

### ➤ Přenos tepla přes stěnu

Většina rekuperačních výměníků obsahuje kanály, kterými jsou teplé a studené tekutiny nuceny proudit. Přenos tepla probíhá přes stěny kanálů oddělujících tekutiny (viz obr.15), a proto lze přenos tepla nazvat jako přenos tepla "skrz stěnu".[1]

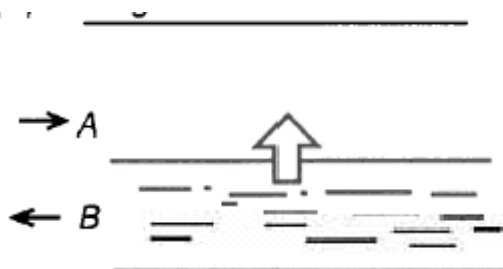


Obr. 15 Přenos tepla přes stěnu [1]

### ➤ Jednofázová a dvoufázová výměna tepla

Toto rozdělení je jedno z nejdůležitějších kritérií, neboť výměník tepla, ve kterém dochází k dvoufázové změně (tj. odpařování nebo kondenzaci) v jednom nebo obou pracovních látkách (viz obr. 17b,c) představuje z hlediska řešení mnohem složitější model chování, než v případě, kdy je výměna tepla realizována v jednofázovém stavu pracovních látek (viz obr. 17a).

Například obr. 17b,c ilustrativně znázorňuje dva možné způsoby dvoufázové výměny tepla. Na obr. 17b se tekutina A odpařuje a přijímá teplo z horké jednofázové (kapalné) tekutiny B a na obr.17c horká tekutina kondenzuje a odevzdává teplo do chladné jednofázové (kapalné) tekutiny B. [1]



Obr. 17a) jednofázová výměna tepla [1]



Obr. 17b) vypařování [1]



Obr. 17c) kondenzace [1]

#### 4.1.2 Rozdělení dle konstrukce - rekuperační výměníky

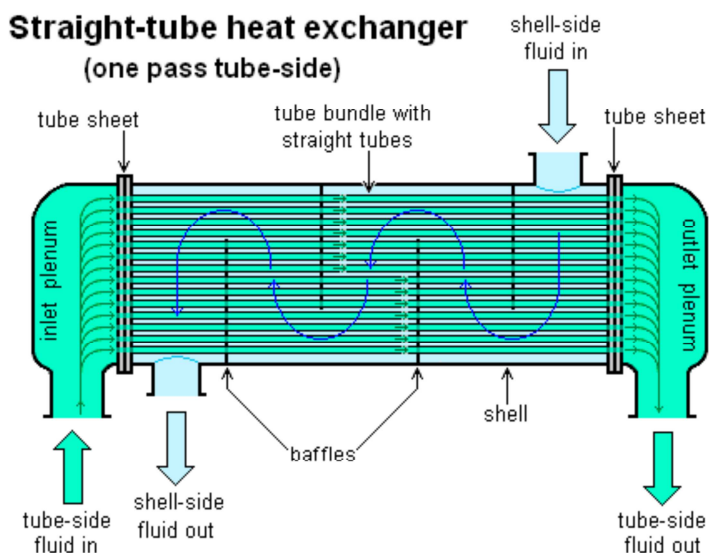
- **Trubkové výměníky**

Jsou nejstarším a nejpoužívanějším typem. Mají výhodný tvar z hlediska pevnostního namáhání. Skládají se z vnějšího pláště a trubek, které jsou uvnitř. Průtočný průřez mezi trubkami bývá typicky 2-3x větší než průtočný průřez trubek. V mezitrubkovém prostoru se obvykle umísťují přepážky, které zpomalují pohyb vnějšího média a prodlužují trajektorii proudění. Trubkových výměníků existuje několik provedení, blíže budou zmíněny dva v průmyslu nejčastěji používané typy.

##### a) Výměník se svazkem trubek v plášti

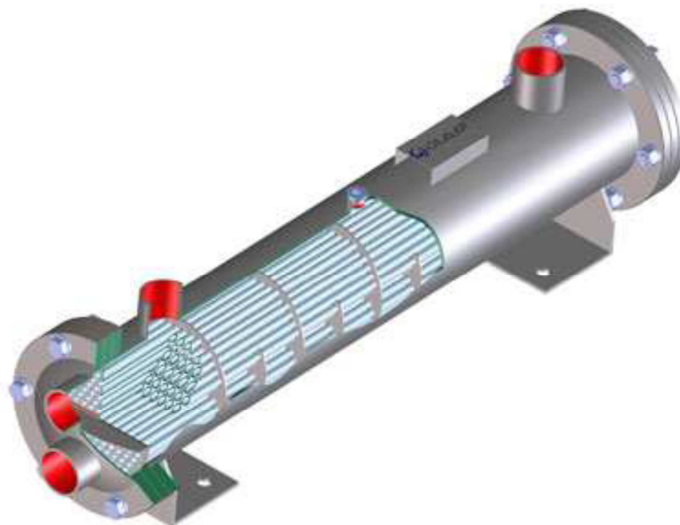
Skládá se především z vnějšího pláště a trubkovic, do nichž jsou zaválcovány trubky. K trubkovicím se připevňují víka. Schéma výměníku je znázorněno na obr. 18, příklad reálného vyobrazení provedení výměníku je na obr. 19.

Mezi výhody tohoto typu výměníku patří jednoduchá výroba, možnost výměny poškozené trubky, dále pak možnost užití minimální tloušťky stěny, což vede ke snížení hmotnosti. Vnitřní části trubek u uvedeného provedení se snadno čistí a to i mechanicky.



Obr.18 Schéma výměníku se svazkem trubek v plášti [2]

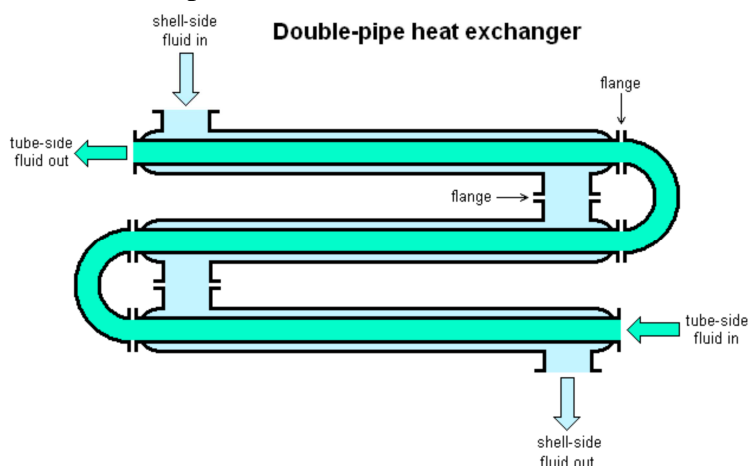
Nevýhodou tohoto typu konstrukce je problém s tepelnou dilatací. Ta se dá řešit konstrukčními úpravami. Např. kompenzace s ucpávkou, kompenzace pružným zvlněním pláště nebo kompenzace plovoucí hlavy.



Obr.19 Výměník se svazkem trubek v plášti [3]

#### b) Výměník trubka v trubce

Povrch výměníků tohoto typu, pracující při velkých rychlostech, je méně znečišťován produkty koroze a mechanickými nečistotami. Výměníky typu trubka v trubce pracují často s větší účinností než trubkové výměníky s přepážkovými systémy v plášti. Ve velké řadě případů je pro výměníky tepla typu trubka v trubce z hlediska konstrukce vhodnější použít žebrované plochy výměny tepla. Žebrováním se plocha výměny tepla z jedné strany obvykle zvětší 4 až 5 krát. To je výhodné v těch případech, kdy je z jedné strany obtížné zajistit velkou hodnotu součinitele přestupu tepla. Používá se pro malé teplotní rozdíly mezi médii, malé tlaky a pro malé průtočné množství pracovních látek.

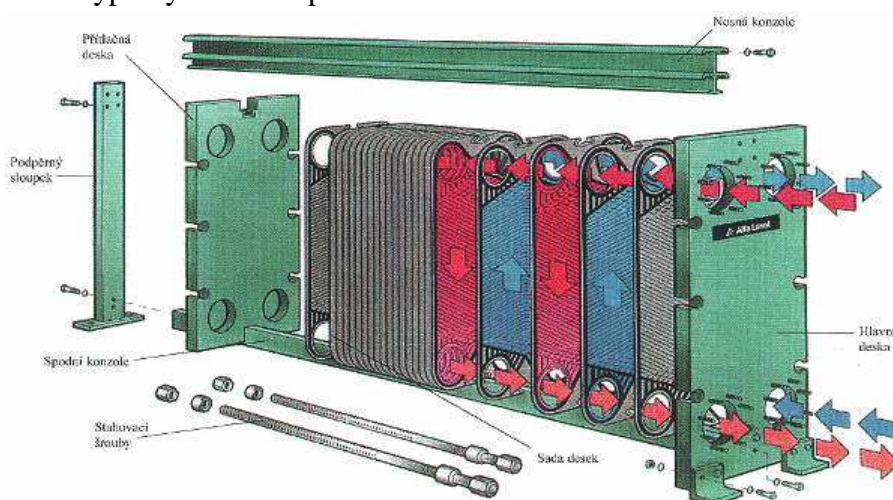


Obr. 20 Schéma výměníku [2]



- **Deskové výměníky**

Deskový výměník tepla tvoří soubor desek lisovaných z různých materiálů v závislosti na požadavcích aplikace. Mezi používané materiály patří i grafit, který je aplikován pro případy s velice agresivními médii. Mezi deskami výměníku tepla díky jejich profilovanému povrchu vznikají oddělené kanály, kde protéká ohřívané i chlazené médium. Každá deska výměníku tepla je obtékána primárním médiem z jedné strany a sekundárním médiem ze strany druhé. Mezi jednotlivými médii dochází přes stěnu desky k výměně tepla. Vzhledem k rozměrům a provedení kanálů je tento typ výměníku tepla preferovaný pro výměnu tepla především čistých pracovních látek nebo látek s velmi mírnou tendencí k zanášení. V procesu výroby cementu se tento typ výměníku neuplatňuje a je uveden pouze pro dokreslení situace a úplný výčet základních typů výměníků tepla.

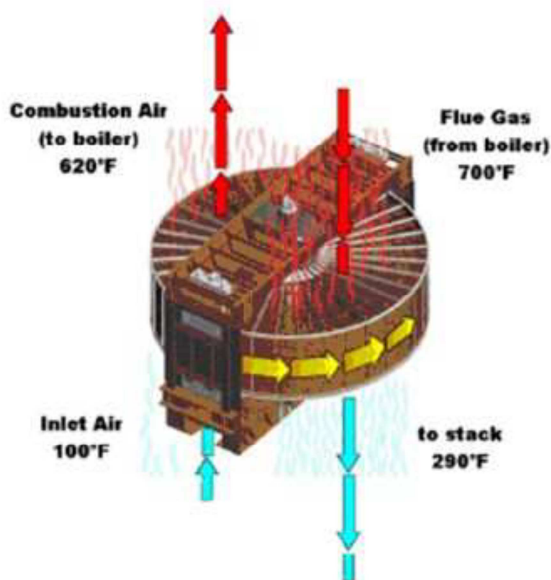


Obr. 21 Deskový výměník [7]

#### 4.1.3 Rozdělení dle konstrukce - regenerační výměníky

Regenerační výměníky se nejčastěji používají v energetice jako ohříváky vzduchu, spaliny - vzduch. Přenos tepla se uskutečňuje prostřednictvím pohyblivé (rotační) nebo nepohyblivé výplně. Výměníky s pohyblivou výplní můžeme dále rozdělit na horizontální a vertikální.

Princip regeneračního vertikálního výměníku je znázorněn na obr. 22. Ohřívací médium předává teplo této výplni a následně se toto naakumulované teplo předává médiu ohřívámu. Rotor je vestavěn do uzavřeného prostoru, rozděleného a současně utěsněného sektorovými deskami na spalínovou a vzduchovou část. Utěsnění rotoru je provedeno pevnými kovovými ucpávkami upevněnými radiálně a axiálně na konstrukci mezi jednotlivými sektory.



Obr. 22 Schéma regeneračního výměníku [4]

Výhřevná náplň musí splňovat několik požadavků jako dobrý přenos tepla, malé tlakové ztráty, levné zhotovení, snadné čištění za provozu, odolnost proti korozi. Výhřevná náplň je uložena v rotoru ve dvou až třech vrstvách.

Zařízení na výměnu tepla používané v procesu výroby cementu spadají především do oblasti výměníků s přímým kontaktem pracovních látek, jak bude blíže představeno v následující kapitole.

#### **4.2 Zařízení pro předehřev a kalcinaci práškové cementářské suroviny**

Účelem zařízení pro předehřev je to, že při požadavku vysoké předkalcinace suroviny před vstupem do pece lze s výhodou zavést do kalcinační komory část směsi spalín a vzduchu od chladiče, mezi kalcinační komorou a odlučovačem kalcinátu jinou část směsi spalín a vzduchu a do přívodního kanálu cyklonového stupně zavést menší část kalcinačního paliva, nebo i další část směsi od chladiče.

Uvedeného účelu se dosahuje v podstatě tím, že výstupní hrdlo plynů z odlučovacího cyklónu cyklonového stupně dolní části šachtového výměníku je napojeno na vstupní kanál plynů do souproudé kalcinační komory, přičemž přívodní kanál cyklonového stupně je napojen na přechodový kus pece a výstupní hrdla plynů z odlučovačů kalcinátu jsou napojena na vstupní kanály plynů do šachty.

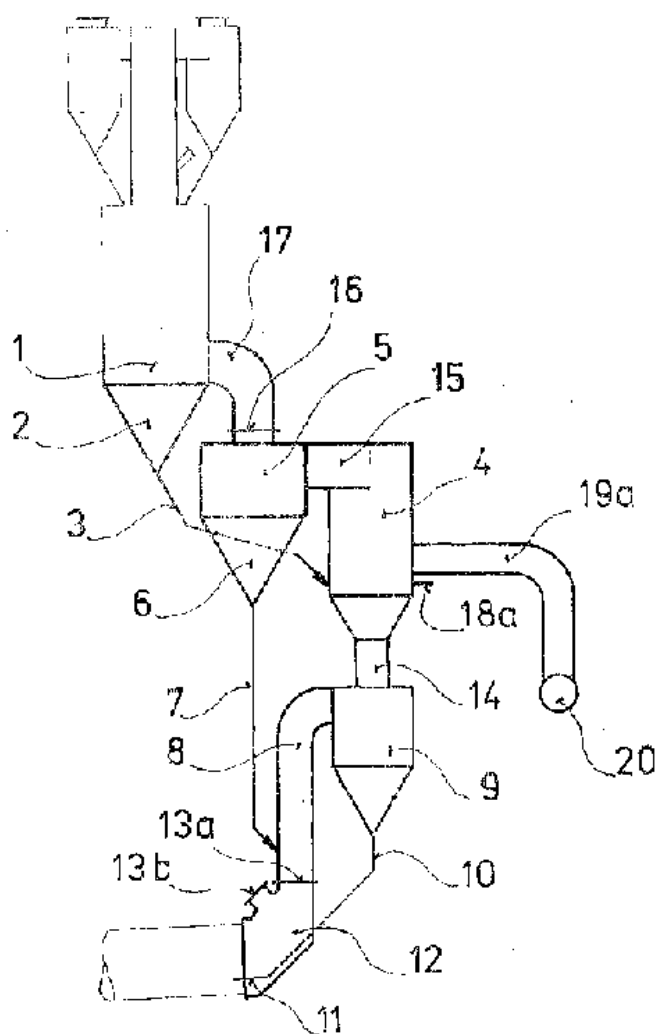
Řešení se týká zařízení pro předehřev a kalcinaci práškové cementářské suroviny před jejím dalším tepelným zpracováním v peci a chladiči.

Známé šachtové výměníky tepla používají k odloučení a dílčímu předehřevu nebo i ke kalcinaci suroviny cyklonové stupně uspořádané v sériovém zapojení nad šachtou, nebo i pod šachtou a sestávající z přívodních kanálů a odlučovacích cyklónů. Dolní část známých šachtových výměníků s cyklonovými stupni pod šachtou a se souproudou kalcinační komorou, vybavenou alespoň jedním hořákem a jedním odlučovačem a využívající ke kalcinaci alespoň část plynů přiváděných z pece, je uspořádána tak, že kalcinační komora je nejméně jedním ze svých vstupních hrdlech spojena přímo, nebo pouze prostřednictvím kanálu, nebo cyklonového stupně se spodní částí šachty, přičemž výsypka odlučovače je spojena skluzem suroviny se žlabem přechodového kusu pece. Toto známé uspořádání má nevýhodu v tom, že kalcinační komora se zatěžuje jak teplem zaprášených horkých pecních plynů, tak i teplem z kalcinačního paliva, což vzhledem k omezené rychlosti kalcinace vede ke vzniku velmi horkých zón v kalcinační komoře s rizikem natavování zkalcinovaných podílů pecního úletu obohacených škodlivinami na stěny komory. Další nevýhoda pozůstává v termodynamicky nevhodném mísení horkých pecních plynů s mnohem chladnějším spalovacím vzduchem, jestliže je vzduch do komory přiváděn z chladiče. Jiná nevýhoda tohoto známého uspořádání spočívá ve velkých rozměrech, nebo velké tlakové ztrátě kalcinační komory, má-li být dosaženo doby kalcinace dostatečně pro využití velkého množství tepla jednorázově přivedeného do kalcinační komory, ke kalcinaci bez nadměrných ztrát nespálenými částmi paliva či vysokými teplotami v plynech odváděných z odlučovače kalcinační komory.

Uvedené nedostatky odstraňuje patentované zařízení pro předehřev a kalcinaci cementářské suroviny, tvořené v podstatě tím, že výstupní hrdlo plynů z odlučovacího cyklónu cyklonového stupně dolní části šachtového výměníku je napojeno na vstupní kanál plynů do souproudé kalcinační komory, přičemž přívodní kanál plynů cyklonového stupně je spojen s výstupním hrdlem plynů z pece a výstupní hrdlo plynů z odlučovače kalcinátu je napojeno na vstupní kanál plynů šachty. Surovina z výsypky šachty je přitom svedena do kalcinační komory a kalcinát z odlučovačů kalcinační komory je zaveden do přívodního kanálu plynů cyklonového stupně, nebo do přechodového kusu pece nad místem zaústění suroviny z cyklonového stupně.



Výhodou patentovaného zařízení je to, že při požadavku vysoké předkalcinace suroviny před jejím vstupem do pece lze s výhodou zavést do kalcinační komory část vzduchu od chladiče, mezi kalcinační komorou a odlučovačem kalcinátu jinou část vzduchu od chladiče a do přívodního kanálu cyklónového stupně zavést menší část kalcinačního paliva, nebo i další část vzduchu od chladiče. Zařízení podle vynálezu umožňuje širokou regulaci množství vzduchu přiváděného od chladiče bez proměnlivého, nebo nadměrného škrcení vstupního průřezu pecních plynů před místem připojení potrubí vzduchu od chladiče. Dále umožňuje využít spalování kalcinačního paliva i veškerý falešný vzduch přiváděný do dolní části šachtového výměníku a při použití tuhého paliva omezit vlivem redukčního prostředí v přechodovém kusu pece v přívodním kanálu cyklónového stupně tvorbou sulfátů vápenatých a alkalických a koncentraci kyslíčnicku dusíku. Nespálené zbytky tuhého hrubšího, či hůře vyhořívajícího kalcinačního paliva jsou spolu se surovinou svedeny do proudu pecních plynů obsahujících kyslík a dohoří buď v cyklónovém stupni šachtového výměníku, nebo v peci.



Obr.22 Zařízení po přehřev a kalcinaci práškové cementářské suroviny [5]

Příkladné zařízení je schematicky naznačeno na obr. 22. Surovina ze šachty 1 šachtového výměníku se z výsyvky 2 zavádí do potrubí 3 zaústěného do kalcinační komory 4, odkud je za kalcinace odnesena v souproudu do odlučovače 5 kalcinátu. Z jeho výsyvky 6 je skluzem 7 svedena do přívodního kanálu 8 plynů cyklónového stupně a odlučována v odlučovacím cyklónu 9, odkud padá skluzem 10, na žlab 11 přechodového kusu 12 pece.

pecní plyny z přechodového kusu pece mohou být z části hrdlem 13b odváděny do obtoku, nebo do jiného výměníku. Z hrdla 13a jsou pecní plyny zavedeny do přívodního kanálu 8 cyklónového stupně, v odlučovací cyklónu 9 jsou zbaveny většiny suroviny a přes kanál 14 jsou nasávány do souprouté kalcinační komory 4, kde se mísí se spaliny z kalcinačního paliva přiváděného do kalcinační komory hořákem 18a a spalovaného s využitím teplého vzduchu od chladiče slínku, přivedeného z potrubí 20 do kalcinační komory 4 přípojkou 19a. Předávající své teplo surovině jsou směšné plyny přes spojovací kanál 15 vedeny do odlučovače 5 kalcinátu. Po odloučení podstatné části kalcinátu jsou plyny z odlučovače hrdlem 16 zavedeny přes kanál 17 do dolní části šachty 1, kde předeřívají surovinu.

Řídícím ukazatelem pro spotřebu moderního pecního systému je účinnost disperzního výměníku spolu s kalcinátorem. Teplo uvolněné z procesu hoření v rotační peci a kalcinátoru je přenášeno na surovinu při jejím průchodu paralelními toky plynů v cyklónových stupních. Přenos tepla závisí na optimální distribuci suroviny do stoupajícího potrubí a odtřídění z proudu plynů v moderních cyklonech s nízkou tlakovou ztrátou. Každý cyklónový stupeň je utěsněn proti zpětnému proudění plynu přes skluz suroviny kývavou klapkou. Přenos tepla, ke kterému dochází v propojovacích potrubích mezi jednotlivými cyklónovými stupni, závisí na:

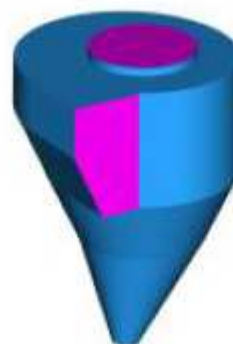
- optimálním rozptýlu suroviny do horkého proudu plynů
- odpovídajícím rezidenčním čase suroviny v horkém proudu plynů mezi cyklónovými stupni (protiproudé proudění)
- efektivnosti odtřídění (účinnosti separace) suroviny v cyklónových stupních při minimální tlakové ztrátě.

Ačkoliv počet cyklónových stupňů určuje specifickou spotřebu tepla, jedná se stále o kompromis mezi výkonností pecního systému a požadavky na sušení suroviny

Cyklony s vysokou odlučivostí a nízkou tlakovou ztrátou jsou používány na prvním (nejvyšším) stupni, kde je požadována účinnost 98 - 97%.



Obr. 23 3D model cyklónu s vysokou odlučivostí pro první stupeň systému [6]



Obr. 24 3D model cyklónu s nízkou tlakovou ztrátou pro spodní stupeň systému [6]

## Cyklonové klapky

Klapky s protizávažím těsní spodní část každého cyklónu a zabráňují zpětnému průniku plynů postupujících cyklony, které dopravují zadržený materiál až do dalšího cyklonového stupně. Klapky jsou konstruovány s ohledem na snadný přístup a ustavení. Jednoduchý pohyb klapek s protizávažím zajišťuje jejich uložení na břitech.



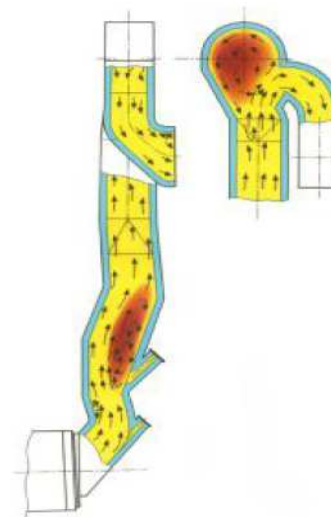
Obr. 25 Cyklonová klapka

## Kalcinátory

Modulová konstrukce kalcinátorů umožňuje splnění všech možných procesních požadavků. Svým řešením, ideálním pro spalování méně hmotných tuhých alternativních paliv, jsou kalcinátory efektním prostředkem pro kontrolu emisí NOx.

### Kalcinační kanál KKN-AT

Předehrátý materiál vstupuje do kalcinačního kanálu v šikmé části, kde jsou umístěny hořáky. Tvar této spodní části vstupní komory zajišťuje efektivní mísení suroviny a paliva s plyny. Recirkulační efekt způsobuje, že těžší zrna materiálu, nebo shluky paliva zůstávají déle v prostoru. Tok plynů odnáší části suroviny do střední části s kruhovým průřezem. Tato kruhová část přechází do vírové hlavy, která tvoří horní část kalcinačního kanálu. Proces výpalu a kalcinace suroviny je zde dokončen pomocí intenzivního turbulentního víření. Spolu s jednoduchou obsluhou snižuje řešení kalcinačního kanálu celkovou tepelnou spotřebu spalováním části paliva mimo rotační pec.



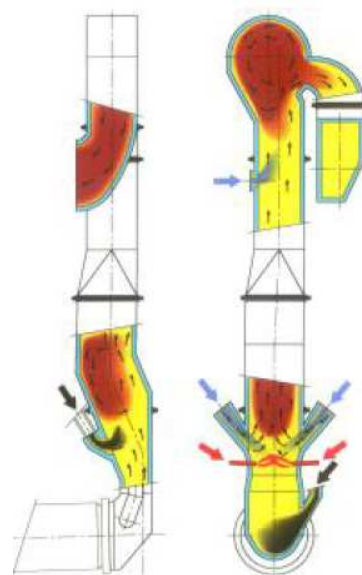
Obr.26 kalcinační kanál KKN-AT [6]

Výhody:

- modulová konstrukce dovoluje spalovat až 25% paliva a pozdější modifikaci na kalcinátor s terciárním vzduchovodem.
- svým inovativním uspořádáním ve stávající výměňkové věži je kalcinátor ideální zařízení pro modernizace menšího rozsahu

### kalcinační kanál KKN-AS

Samostatné terciární potrubí zásobuje kalcinační kanál spalovacím vzduchem ve spodní části kanálu. Tvar této spodní části vstupní komory zaručuje efektivní smísení vzduchu z terciárního vzduchovodu, suroviny a paliva. Recirkulační efekt způsobuje, že těžší zrna materiálu, nebo shluky paliva zůstávají déle v prostoru. V případě požadavku na redukci NO<sub>x</sub> emisí je dodávka terciárních plynů rozdělena na část zásobující spodní část systému a část vedenou do přechodové části pod vírovou hlavou. Nastavitelný poměr rozdělení dodávky terciárního vzduchu mezi vstupními body umožňuje kontrolu NO<sub>x</sub> v rámci redukční atmosféry a atmosféry bohaté na kyslík v horní části kalcinačního kanálu. Vírová hlava tvoří horní část kalcinačního kanálu. Proces výpalu suroviny je zde dokončen pomocí intenzivního turbulentního víření v atmosféře bohaté na kyslík.



Obr. 27 kalcinační kanál KKN-AS [6]

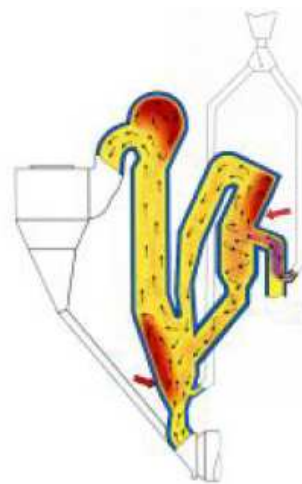
Výhody:

- spalování až 60% paliva
- redukce NO<sub>x</sub>
- Inovativní konstrukce umožňuje snadnou modernizaci ve stávající výměníkové věži
- maximální univerzálnost daná několika místy pro dávkování paliva
- možnost modernizace se selektivní nekatalytickou redukcí NO<sub>x</sub>

### Dvoustupňový kalcinační systém KS-AS-W

Rostoucí požadavky na spalování různých druhů paliv včetně tuhých odpadů vedly k vývoji systému, který tato paliva spolehlivě spálí. Zmíněný systém je systém dvoustupňový kombinující kalcinační systémy "off-line" a "in-line". Kalcinační komora tvoří první kalcinační stupeň konstruovaný jako off-line kalcinátor vhodný pro spalování téměř všech typů paliv včetně obtížně spalitelných jako koks, nebo alternativní paliva větší velikosti. Spalování v čistém plynu a horkém jádru v centru komory zajišťuje rychlé vznícení.

Stěny kalcinační komory jsou chráněny vířící surovinou. Kalcinační kanál spolu s vírovou hlavou tvoří druhý kalcinační stupeň.



Obr. 27 dvoustupňový kalcinační systém KS-AS-W [6]

Proud výstupních pecních plynů se mísí s proudy plynu a suroviny vycházejícími z kalcinační komory. Další palivo je přidáváno do kalcinačního kanálu. Řešení kalcinačního kanálu zajišťuje dlouhý rezidenční čas potřebný pro optimální přenos tepla, kalcinaci a schopnost redukce NO<sub>x</sub>.

Díky vysokoteplotnímu jádru v kalcinační komoře mohou být spalovány směsi drcených pneumatik a mix. plastů, dřeva, papíru a oblečení. Teploty v horké zóně dosahují 1100 -



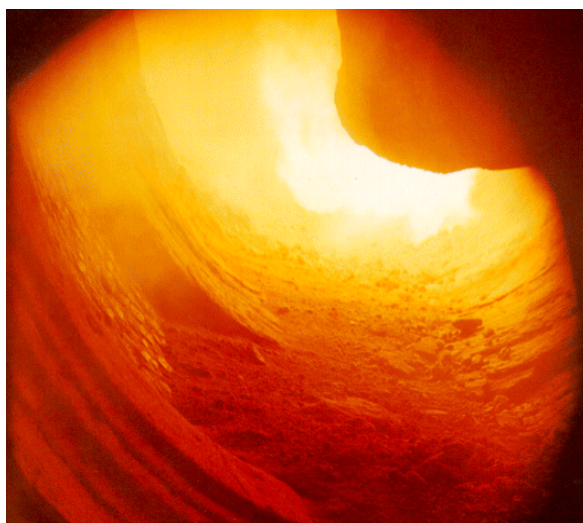
1300°C. Intenzivní přenos tepla v centru komory zajišťuje rychlé vznícení tuhých paliv. Clona suroviny a plynů zajišťuje nižší teplotu podél stěn kalcinační komory.

#### 4.3 Systém predehřevu surovinové moučky

Pecní linka sestává z pecního výměníku tepla s dlouhým kalcinačním kanálem a kalcinační komorou pro spalování alternativních paliv, rotační pece průměru 4,3 x 67 m, roštového chladiče a terciárního vzduchovodu. Doprava suroviny do výměníku je pneumatická na podlaží cyklonů CI, kde je umístěn filtr, z něhož pokračuje jako mechanická.



Obr. 28 Rotační pec s potrubním přívodem terciárního vzduchu a kalcinačním kanálem



Obr. 29 Pohled do rotační pece

##### 4.3.1 Kalcinační kanál KKN

Speciálně tvarovaný kalcinační kanál KKN s vírovou hlavou je vestavěn do rozšířené nosné konstrukce cyklónového výměníku. Tento kanál zajišťuje intenzivní výměnu tepla mezi plyny a surovinou a navíc umožní případné dohoření kalcinačního pecního paliva ještě před vstupem plynů do spodního, tzv. horkého cyklonu C4.

Účinná teplotní funkce dolní části kanálu je založena na zpětném víru a recirkulačním efektu, který vzniká v jeho spodní části. Zde surovina vykonává zpětný recirkulační pohyb, a tak setrvává delší dobu ve styku s plyny. Z tohoto prostoru pak směs suroviny a plynů proudí přes svislou střední část do vírové hlavy, kde za intenzivního míchání je tento teplovýměnný a spalovací proces ukončen.



Obr. 30 Spodní část kalcinačního kanálu

Umístění kalcinačního kanálu v soustavě výměny tepla je provedeno tak, že tento kalcinační kanál navazuje ve své spodní části na patní kus rotační pece. Vírová hlava v jeho horní části je propojena sestupným kanálem s cyklonem C4 spodního stupně výměníku. Do spodní části kalcinačního kanálu je zaústěna přehřátá surovina z předposledního cyklonu.

Do dolního vstupního průřezu kalcinačního kanálu je možné nainstalovat škrtkové plechy, které by omezovaly světlý průřez tohoto vstupu. Zmíněný krok slouží pro dosažení optimálních vzduchotechnických poměrů při zapojení kalcinačního stupně s možností regulace průtoku v terciárním vzduchovodu.

#### **4.3.2 Kalcinační komora SCC**

Speciálně tvarovaná kalcinační komora SCC (secondary combustion chamber) je umístěna ve stávající nosné konstrukci cyklónového výměníku bezprostředně vedle spodní části KKN (viz obr. 31).

Do horní části komory je přiváděn tangenciálně terciární vzduch přes terciární vzduchovod ze žárové hlavy. Z tohoto vzduchovodu jsou dále vedeny samostatné odbočky k hořáku ve stropu SCC a do válcové části KKN pro snížení emisí NO<sub>x</sub>. Dále je do stropu kalcinační komory přiváděna část suroviny z cyklonu C3 ke kalcinaci. Množství přiváděné suroviny je ovládané děličem pod cyklonem C3. Nastavením děliče řídíme teplotní režim v kalcinační komoře SCC.

Vertikálně v ose komory na horní spirále je umístěn kalcinační hořák. Separátním potrubím jsou do stropu SCC přiváděna alternativní paliva. Z kalcinačního stupně jsou spaliny se surovinou odváděny do spodní části kalcinačního kanálu KKN.



Obr. 31 Kalcinační komora

Kalcinační hořák je nainstalovaný na stropě kalcinační komory SCC svisle dolů. Kalcinační hořák je na dvě paliva - práškové palivo (uhlí) a plyn. Hořák je vybaven zapalovacím zařízením. Jako startovací palivo se používá plyn.

Celkové uspořádání kalcinačního stupně umožňuje použití různých druhů paliv pro dosažení vyššího stupně kalcinace suroviny před vstupem do rotační pece

Pecní linku lze alternativně provozovat při sníženém výkonu i bez spalování v kalcinačním stupni, kdy je terciární vzduchovod zavřen a veškerá surovina z cyklonu C3 je přiváděna přímo do spodní části KKN.



Obr. 32 Kalcinační dělič suroviny



Obr. 33 Kalcinační hořák

#### **4.3.3 Rotační pec**

V rotační peci průměru 4,3 x 67m je dokončena kalcinace suroviny a probíhá výpal slínku. Vypálený slínek vypadává z rotační pece přes žárovou hlavu na rošt chladiče. Pec je uložena na třech podporách. U první podpory (tzv. I. Základu) je nainstalovaná hydraulická axiální kladka, která řídí axiální pohyb pece. Na obou koncích rotační pece jsou těsnění zamezující vnikání falešného vzduchu.



Obr. 34 Uložení rotační pece



#### ***4.3.4 Terciární vzduchovod***

Terciární vzduchovod je opatřen vyzdívkou a vede ze žárové hlavy horký vzduch do kalcinační komory SCC. Z hlavního vzduchovodu před výměníkem jsou samostatné odbočky ke kalcinačnímu hořáku a potrubí NOx, které vede do horní části kalcinačního kanálu a slouží ke snížení emisí NOx. Každá větev terciárního vzduchovodu je vybavena samostatnou klapkou ovládanou servomotorem. Dále jsou vzduchovody vybaveny dilatačními kusy.



Obr. 35 Napojení terc. vzduchovodu ze žárové hlavy



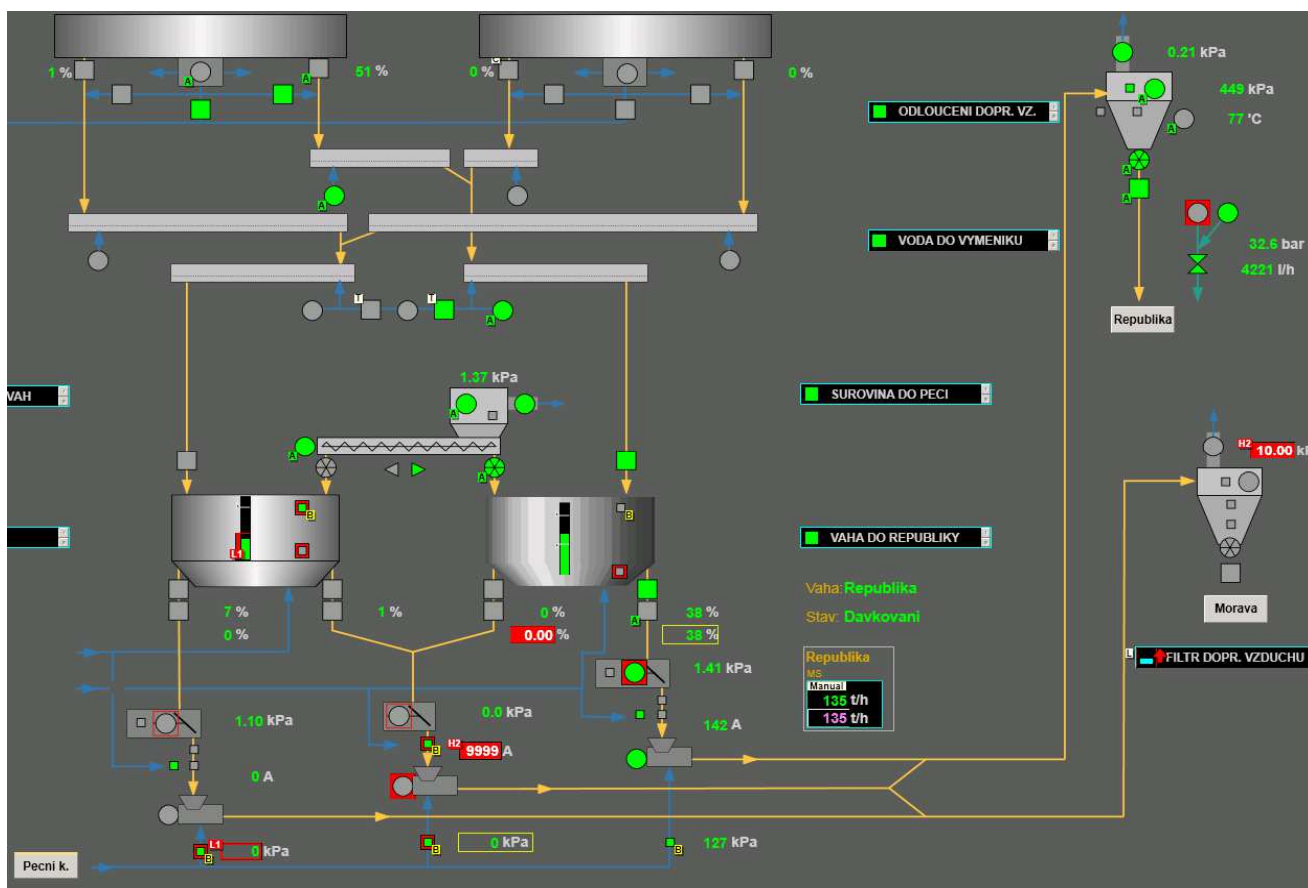
## 5 ŘEŠENÍ ODLOUČENÍ DOPRAVOVANÉHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU SUROVINOVÉ MOUČKY

Jedná se o instalaci odlučovacího zařízení na podlaží + 58,750 m soustavy výměny tepla, tzv. výměníku RPS. Odloučením dopravního vzduchu ze surovinové moučky se zamezí přísávání falešného vzduchu do výměníku a tím se sníží spotřeba tepla pro výpal slinku.

### 5.1 Dávkování surovinové moučky

Doprava surovinové moučky ze zásobníků sil na výměníky je řešena pneumaticky - dopravními žlaby do zásobníků nad pecní vahou a přes skluzové váhy a šnekové, tzv. Fullerovy čerpadla, kde za pomoci kompresoru je vynášena potrubím na sedmé patro výměníku „na 58m“. Zde je ve filtru na „58m“ odloučen vzduch a surovina vstupuje do výměníku pecní linky přes turniket a bezpečnostní hydraulickou klapku. Tímto způsobem je z pneumatické dopravy do výměníku přiváděn falešný vzduch, který negativně ovlivňuje tepelnou bilanci výměníku.

Při současném provozu je možné dosáhnout maximálního dopravního výkonu surovinové moučky 142 t/h.



Obr. 36 Schéma postupu surovinové moučky ze zásobníků do cyklónového výměníku [9]



Obr. 37 Doprava surovinové moučky ze zásobních sil pneumatickým potrubím

Vedle zásobních sil je umístěna kompresorovna pro dopravu materiálu pneumatickým potrubím do výměníku RPS. Na obr. 38 vidíme technologické schéma umístění kompresorů a Fullerových čerpadel. Pro dopravu surovinové moučky je použit kompresor, který je na obrázku označen jako M 291 - VM 410 a Fullerovo čerpadlo CPAG - Rep II. V příloze č.1 diplomové práce je uveden výkres Fullerova čerpadla.

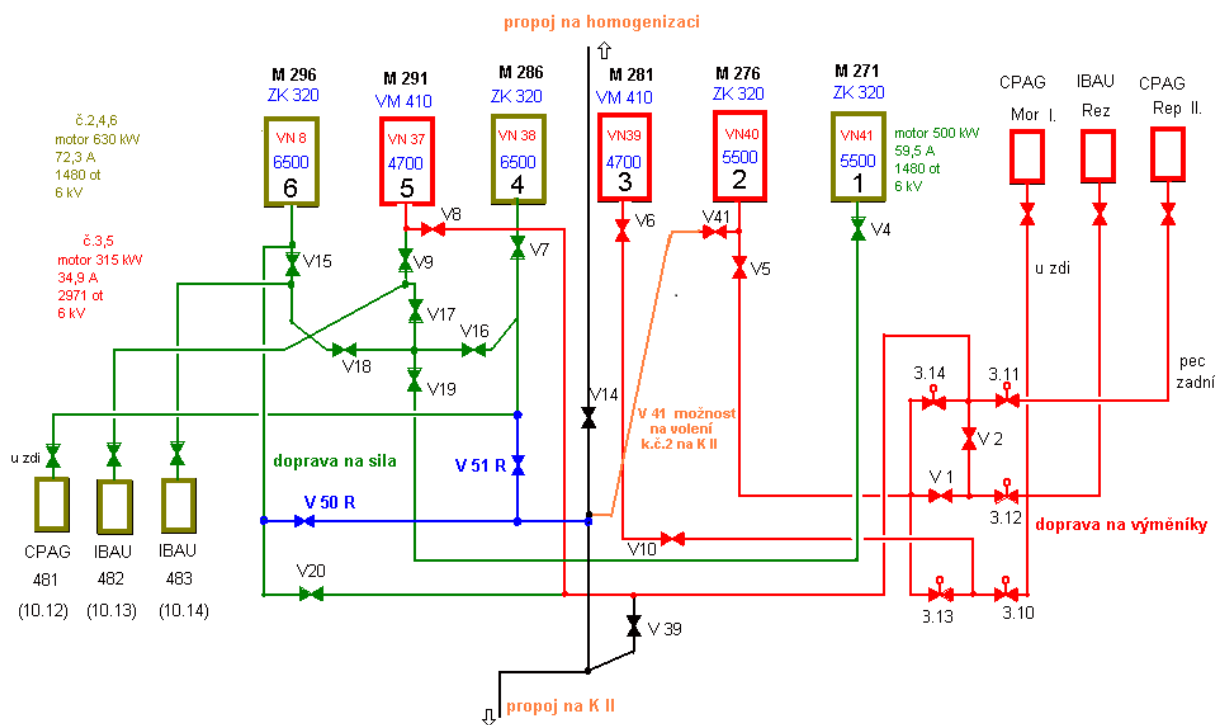
#### **Provozní parametry kompresoru:**

Typ:	VM-410-3
Rok výroby:	1993 (Germany)
Sériové číslo:	372582
Výkon (sací):	4700 m <sup>3</sup> /hod
Tlak v potrubí:	54 kpa
Teplota vzduchu:	90 °C

#### **Provozní parametry čerpadla:**

Rok výroby:	1998 (Germany)
Výkon:	110 kW

## KOMPRESOROVNA I - část doprava materiálu



Obr. 38 Technologické schéma kompresorovny [9]

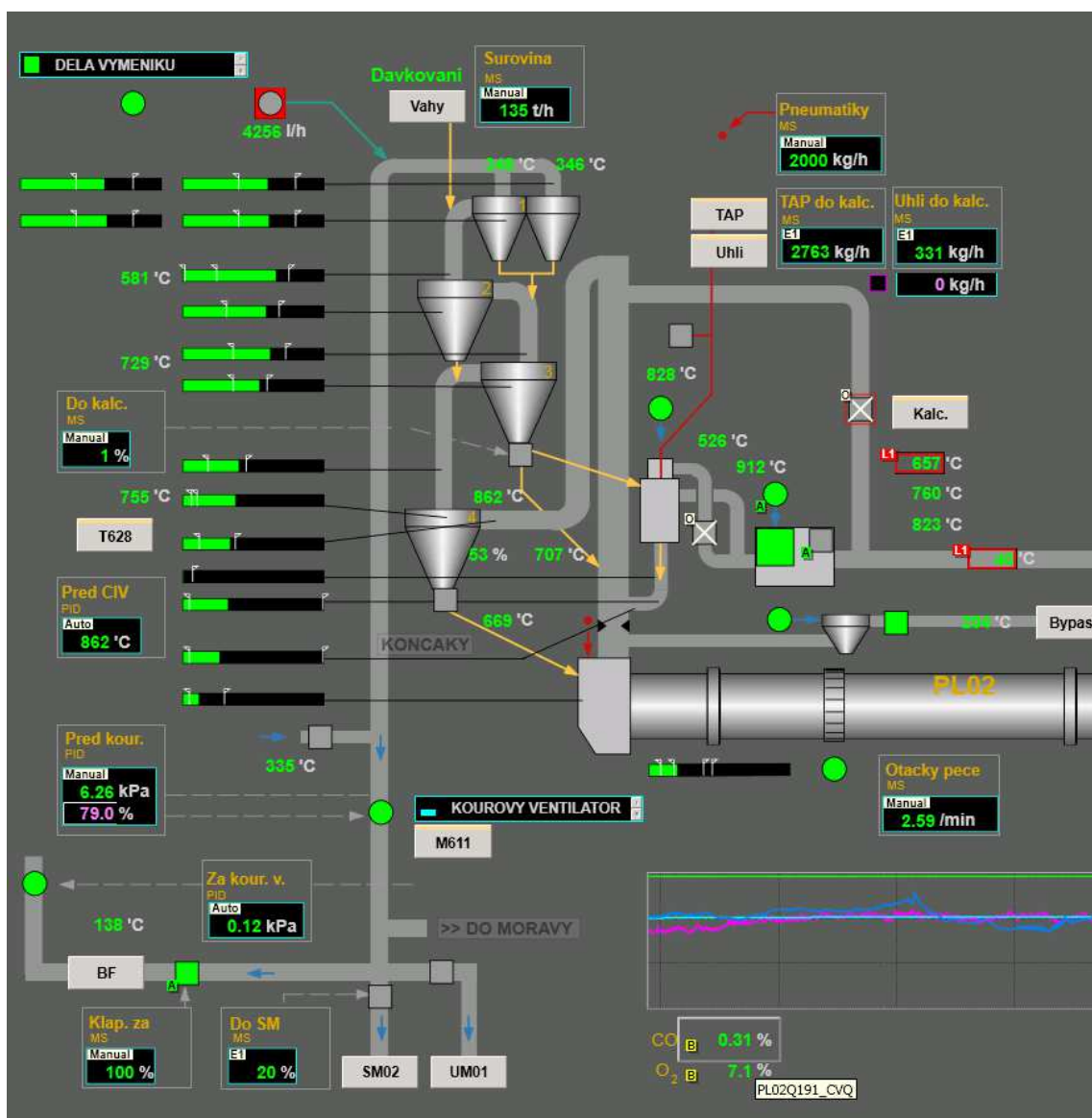


Obr. 39 Fullerovo čerpadlo

## 5.2 Průchod surovinové moučky systémem předehřevu

Na obr. 40 vidíme výřez pecní linky. V příloze č. 2 diplomové práce je uveden celý systém pecní linky včetně roštového chladiče, který pro nás není v tuto chvíli až tak důležitý. Systém předehřevu nazývaný výměník RPS, je tvořen čtyřmi teplovýměnnými stupni a kalcinačním kanálem SCC a konkrétně (viz obr. 40):

- ze dvou cyklonů průměru 5,0 m (C1) prvního předehřívacího stupně ST I s kanálem plynů K21, kde dochází k prvnímu kontaktu dávkované suroviny s plyny přiváděnými z cyklonů stupně ST II. Z odtahových hrdel jsou odváděny odpadní plyny k pecnímu ventilátoru odtahovým potrubím.
- z jednoho cyklonu průměru 5,8 m (C2) druhého předehřívacího stupně ST II, do jehož kanálu plynů K32 padá surovina novými skluzy suroviny ze ST I, opatřenými dvojicí jednoduchých klapek v každém skluzu, a v souproudu je unášena plyny ze ST III do cyklonu tohoto stupně
- z jednoho cyklonu průměru 5,8m (C3) třetího předehřívacího stupně ST III, do jehož kanálu plynů K43 padá surovina stávajícím skluzem suroviny ze ST II, opatřeným jednoduchou klapkou, a v souproudu je unášena plyny ze ST IV do cyklonu tohoto stupně. Z třetího cyklonového stupně je odloučená surovina odváděna skluzem suroviny z ST III vybaveným děličem suroviny D2KV buďto do spodní části kalcinačního kanálu KKN, nebo do kalcinační komory, kde probíhá spalování dalších paliv, k dalšímu předehřevu. Každá z větví je opatřena jednou jednoduchou klapkou.
- z jednoho horkého cyklonu průměru 6,25m (C4) čtvrtého předehřívacího stupně ST IV, který odlučuje předehřátou surovinu přiváděnou společně s plyny z kalcinačního kanálu a kalcinačního stupně. Odloučená surovina je pak skluzem suroviny, opatřeného jednoduchou klapkou, zavedena přes patní kus přímo do rotační pece.
- z kalcinačního stupně průměru 3,16 m tvořeného kalcinačním kanálem KKN a kalcinační komorou SCC, do její horní části je tangenciálně přiváděn terciární vzduch přes terciární vzduchovod ze žárové hlavy. Z tohoto vzduchovodu jsou dále vedeny samostatné odbočky k hořáku ve stropu SCC a do válcové části KKN pro snížení emisí NOx. Dále je do stropu kalcinační komory přiváděna surovina ze stupně ST III k dalšímu předehřevu. Vertikálně v ose komory je umístěn kalcinační hořák, vedle kterého je samostatný vstup pro alternativní paliva. Z kalcinační komory jsou spaliny se surovinou odváděny do spodní části kalcinačního kanálu KKN.



Obr. 40 Pecní linka [9]

### 5.2.1 Zaústění potrubí do hadicového filtru na „58m“

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.1 za stávající pneumatickou dopravu na výměník je na úrovni kotvení cyklonů CI zařazen z důvodu eliminace dopravního vzduchu do výměníku hadicový filtr, ze kterého je surovinová moučka dopravována mechanicky přes rotační uzávěr potrubím do kanálu K21 výměníku. Zaústění potrubí do tkaninového filtru je patrné z obr. 41.





Obr. 41 Zaústění potrubí do tkaninového filtru

### 5.2.2 Hadicový filtr „na 58m“

Na nejvyšším podlaží (+ 58,750 m) výměníku RPS linky bude umístěno odlučovací zařízení (hadicový filtr se stabilizační komorou), do kterého bude zaústěno potrubí surovinové moučky. Přes výsypku filtru, rotační podavač a ocelový skluz bude surovinová moučka dopravena do výměníku. Nad rotačním podavačem bude osazeno pneumatické hradítko pro případ náhlého zvýšení teploty. V ocelovém skluzu před výměníkem bude nainstalována mechanická klapka. Stávající potrubní trasa v délce 175 m bude prodloužena o cca 10 m.

Látkové filtry s pulzní regenerací se používají pro zachycení tuhých znečišťujících látek obsažených ve vzdušině, které netvoří se vzduchem výbušnou směs.

Filtr může být zařazen do podtlakové i přetlakové části. Standardně jsou filtry navrženy pro maximální podtlak ve filtru 5 kPa. Jiné hodnoty tlakové difference je nutno projednat s výrobcem. Filtr není vhodný pro prachy značně lepidivé, hygroskopické a chemicky aktivní. Provozní teplota filtrované vzdušiny se nesmí pohybovat v blízkosti rosného bodu.

Znečištěná vzdušina se přivádí do výsypky a skříně filtru kde se odloučí hrubé částice prachu. Neodloučené částice prachu (dále jen příměsi) jsou unášeny nosnou vzdušinou a zachycují se na vnějším povrchu filtračních hadic.

Zachycené příměsi se odstraňují z hadic pulsy stlačeného vzduchu prostřednictvím systému regenerace. Tyto příměsi padají zpět do výsypky, odkud jsou odváděny samostatným zařízením (rotační podavač).

Časový sled regenerace (čištění) jednotlivých řad filtračních hadic je ovládán řídicím systémem, který pomocí elektromagnetických ventilů otevírá postupně membránové ventily rozdělovače vzduchu.

## Tlaková ztráta

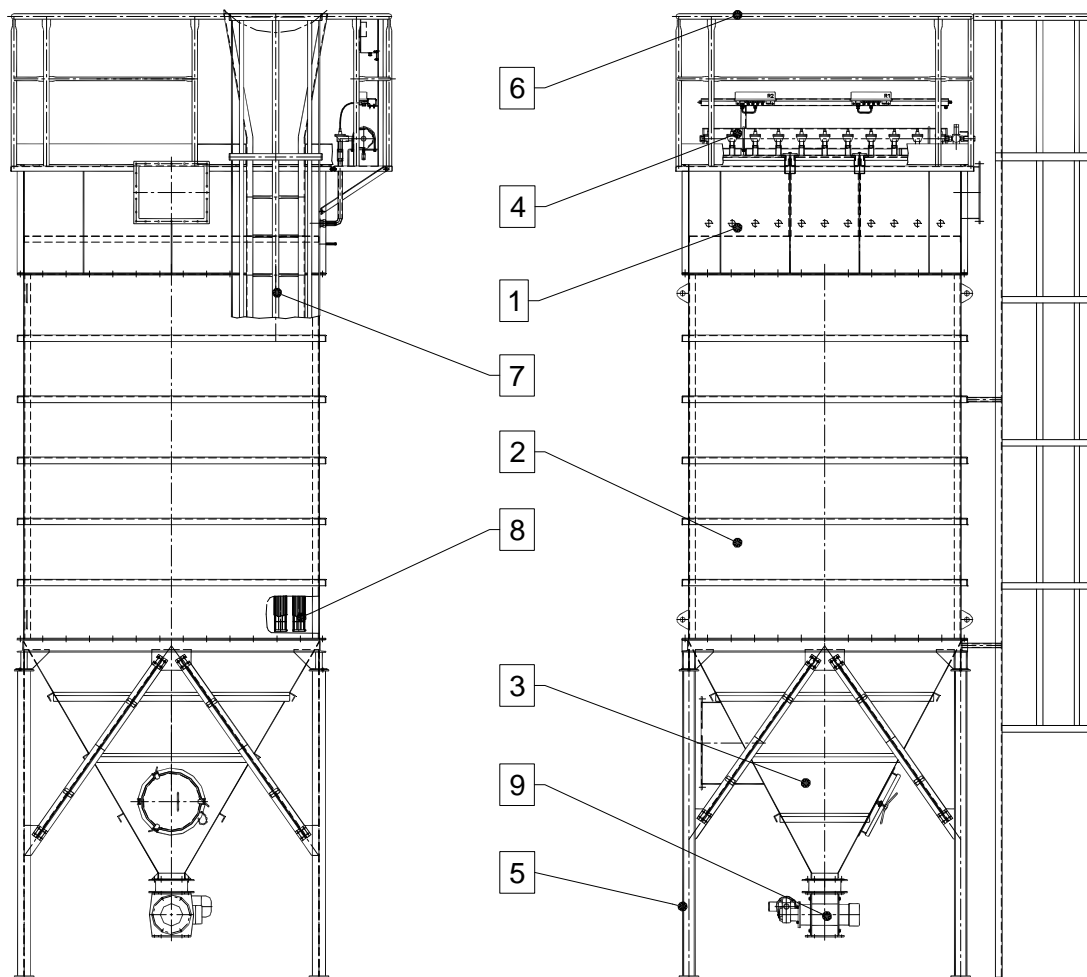
Filtr je dodáván s diferenčním tlakoměrem, který nepřetržitě zobrazuje rozdíl statického tlaku na obou stranách filtračních hadic. Velikost tlakové ztráty na hadicích po spuštění filtru určuje stupeň zanesení filtru prachem. Pulsem stlačeného vzduchu, který může být aktivován v závislosti na tlakové ztrátě nebo pevným časovým cyklem, se odstraní vrstva prachu a tím se zajistí pokles tlakové ztráty hadic. Opakování cyklů regenerace (čištění) a filtrace stabilizuje tlakovou ztrátu na hadicích, takže před regenerací a po ní je změna tlakové ztráty pouze minimální. Rozmezí provozní tlakové ztráty na hadicích je rozdílné pro různé aplikace. Optimální hodnota tlakové ztráty je 500 až 1500 Pa. Maximální přípustná tlaková ztráta na hadicích je 2100 Pa. Protože během jednoho pulsu je regenerováno pouze malé procento hadic, nedojde po pulsu stlačeného vzduchu k žádné významné změně tlakové ztráty hadic.

Tabulka č. 4 Technické parametry hadicového filtru [9]

Legenda	Označení	Hodnota	Jednotka
Typ	<b>EFP-1-3,5-96-D6</b>		
Objemový průtok	$\dot{Q}_{ohf}$	6 600, 10 800	[Nm <sup>3</sup> /h], [m <sup>3</sup> /h]
Teplota vzduchu	$t_{hf}$	max. 150	[°C]
Vstupní koncentrace prachu	$x_p$	13 900	[g/m <sup>3</sup> ]
Složení prachu		Surovinová moučka	
Počet hadic	$n_f$	96	[-]
Filtrační plocha	$A_f$	160,3	[m <sup>2</sup> ]
Průtok látkou	$\dot{Q}$	67,4	[m/h]
Řízení regenerace		0,5, 230, 50	[kW], [V], [Hz]
Vytápění výsypky		4x0,5, 400, 50	[kW], [V], [Hz]
Rotační podavač		5,5, 400, 50	[kW], [V], [Hz]
Šoupátkový uzávěr		0,05, 230, 50	[kW], [V], [Hz]
Stlačený vzduch		22,6, (500 – 730), - 40	[m <sup>3</sup> /h], [kPa], [°C]
Výrobce	ZVVZ - Enven		
Hmotnost	$m$	6 900	[kg]
Max. přetlak ve filtru	$P_{přhf}$	0	[kPa]
Max. podtlak ve filtru	$P_{pohf}$	5,0	[kPa]
Vstupní koncentrace moučky	$x_m$	max. 15 100	[g /m <sup>3</sup> ]

## Hlavní části filtru

Schéma diskutovaného filtru je uvedeno na následujícím obr. 42 spolu s vyznačenými hlavními částmi, jejichž popis (legenda) je proveden pod obrázkem.



Obr. 42 Hadicový filtr [9]

1. Komora čistého plynu
2. Skříň
3. Výsypka
4. Regenerace, časový spínač
5. Podpěrná konstrukce
6. Zábradlí
7. Žebřík
8. Filtrační hadice, podpěrný koš
9. Rotační podavač (uzávěr výsypky)



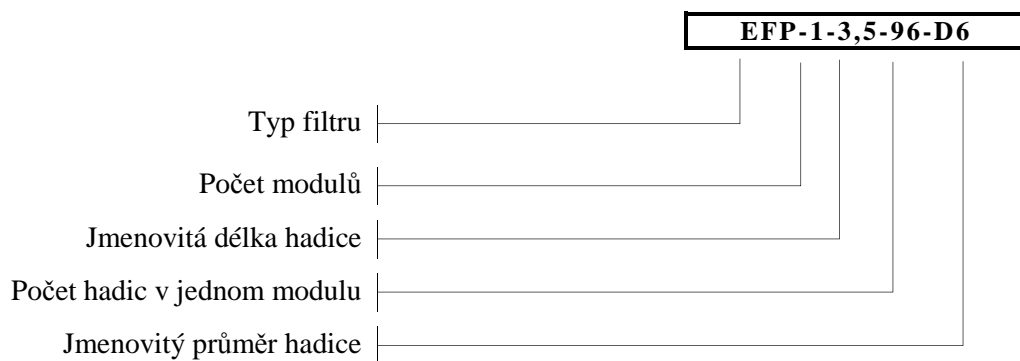
Součástí hadicového filtru je tzv rotační podavač (uzávěr výsypky), který je na obr. 42 označen odkazem číslo 9. Jeho reálné provedení znázorňuje obr. 43. Technické parametry rotačního podavače jsou uvedeny dříve v tabulce č. 4.



Obr. 43 Rotační podavač

### Značení filtru

Filtr skládající se z jednoho modulu, z nichž každý obsahuje 96 ks filtračních hadic o jmenovité délce 3,5m a jmenovitém průměru 6 m se označí:



## Odhad nákladů

odlučovací zařízení	1 400 000 Kč
turniket	600 000 Kč
mechanická klapka	150 000 Kč
OK (skluz, úprava ztužení výměníku, obsluh. lávka)	400 000 Kč
potrubí	300 000 Kč
montáž, mechanismy, lešení	550 000 Kč
elektro, MaR	500 000 Kč
doprava	60 000 Kč
<b>celkem</b>	<b>3 960 000 Kč</b>

### 5.2.3 Ventilátor filtru „na 58m“

Ventilátor filtru „na 58m“ je nezbytný pro správnou funkci filtru. Významné informace týkající se tohoto ventilátoru budou nyní uvedeny.

#### Rozsah dodávky ventilátoru

- ventilátor s pohonem na spojku
- elektrický motor 1LG4 206-2AA, Siemens 1LG4 206-2AA, 30 kW, 2950 rpm, 400V, 50Hz
- elastické kotevní izolátory
- kompenzátory na vstupu a výstupu ventilátoru
- 2 ks tlumičů hluku THKJ pr. 630 / pr. 800 / 1000 KM 0044 / 96

Tabulka č. 5 Technické parametry ventilátoru filtru „na 58m“ [9]

Legenda	Označení	Hodnota	Jednotka
Typ	RVP 630 – 2N – L135°	-	[-]
Poloha skříně	L 135°		[-]
Objemový průtok	$\dot{Q}_v$	10 800	[m <sup>3</sup> /h]
Celkový tlak	$p_c$	3	[kPa]
Teplota vzduchu	$t$	150	[°C]
Otáčky	$n$	2900	[min <sup>-1</sup> ]
Pohon		30, 400, 50	[kW], [V], [Hz]
Hmotnost	$m$	755	[kg]
Objemový průtok vzdušniny	$Q_v$	3,0	[m <sup>3</sup> /s]
Hustota vzdušniny	$\rho$	0,83	[kg/m <sup>3</sup> ]
Příkon	$P_p$	13	[kW]
Prac. teplota	$t_p$	(-10) - 150	[°C]



Obr. 44 Ventilátor filtru „na 58 m“

#### 5.2.4 Kouřový (pecní) ventilátor

Srdcem cyklónového výměníku pro předeřev surovinové moučky je tzv kouřový ( pecní ) ventilátor. Jeho úkolem je odtah veškerých spalin z rotační pece a výměníkového systému. Reguluje a řídí rychlosti pecních spalin a tím předávání tepla surovinové moučce. Horké spaliny za kouřovým ventilátorem jsou dále využívány pro mletí suroviny a mletí uhlí. Přebytek horkých spalin je přes kondicionér a filtr vypouštěn do komínu. Dopravované médium je nasávané oběžným kolem přes sací hrdlo. Oběžným kolem je překonáván odpor soustavy, přičemž je požadovaná energie měněna na formu tlakového zvýšení. Tento proces se odehrává převážně v oblasti oběžného kola ( hlavně účinkem tahové síly způsobené rotací plynu oběžným kolem ) a nízkým podílem v spirální skříni částečným přetvořením dynamického tlakového zvýšení ve zvýšení statické.

Tabulka č. 6 Technické parametry kouřového (pecního) ventilátoru [9]

Legenda	Označení	Hodnota	Jednotka
medium	vzduch	-	[-]
Objemový průtok	$\dot{Q}_{pv}$	132293	[Nm <sup>3</sup> /h]
Hmotnostní průtok	$\dot{m}_{pv}$	54,365	[kg/s]
Provozní teplota	$t_p$	382	[°C]
Max. teplota	$t_{max}$	500	[°C]
Hustota	$\rho_{pv}$	0,561	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vstupní tlak	$P_{in}$	92,1	[kPa]
Geodetická výška	H	200,0	[m]
Vstupní podtlak	$P_{popv}$	-6,71	[kPa]
Celkový nárůst tlaku	$P_c$	7,50	[kPa]
Statický nárůst tlaku	$P_s$	6,71	[kPa]
účinnost	$\eta$	74,9	[%]
Průměr oběžného kola	D	3380	[mm]



Obr. 45 Kouřový (pecní) ventilátor

### 5.3 Výpočet úspor za elektrickou energii a tepla při odloučení dopravního množství vzduchu

#### 5.3.1 Úspora za elektrickou energii s ventilátorem filtru „na 58m“

Stav před odloučením dopravního množství vzduchu:

nastavení měniče pecního ventilátoru:	$M = 84\%$
odběr pecního ventilátoru v Ampérech:	$Opv_A = 1177 \text{ A}$
odběr pecního ventilátoru v KWh:	$OpvK_1 = 1152 \text{ kWh}$
použitá cena elektrické energie:	$E_1 = 2,083 \text{ Kč/kWh}$

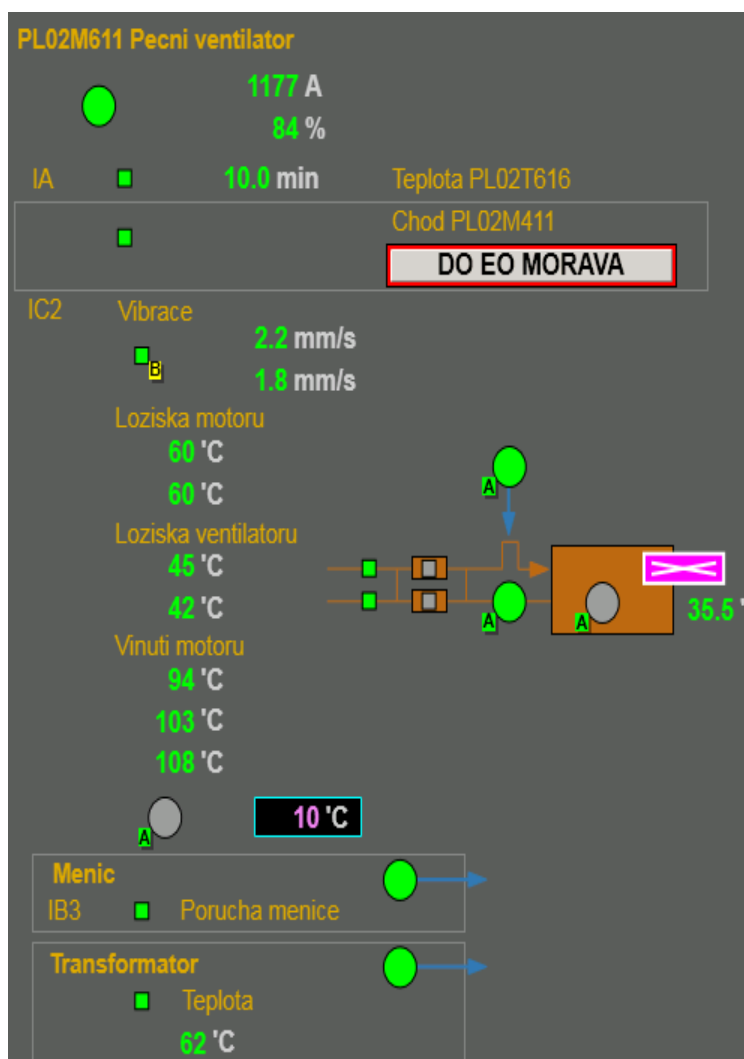
Náklady na kWh před odloučením dop. množství vzduchu:

$$NA_1 = OpvK_1 \times E_1 \quad (1)$$

$$NA_1 = 1152 \times 4,6$$

$$NA_1 = 2399,616 \text{ Kč/hod} \times 24 = 57\,591 \text{ Kč/den} \times 330 = \mathbf{19\,004\,959 \text{ Kč/rok}}$$

Jak je z výpočtu zřejmé, náklady na provozování pecního ventilátoru jsou značným nákladem při výrobě slínku (cca 19 000 000 Kč). Jakákoliv úspora na těchto nákladech je snahou cementárny. Hodnota 330 dní udává maximální provozní hodiny v roce. Dalších 28 dní připadá na každoroční generální opravy a zbytek je počítáno pro neplánované a havarijní odstávky.



Obr. 46 Výpočtové schéma pro pecní ventilátor před odloučením vzduchu [9]

#### Stav po odloučení dopravního množství vzduchu:

nastavení měniče pecního ventilátoru:  
 odběr pecního ventilátoru v Ampérech:  
 odběr pecního ventilátoru v kWh:  
 použitá cena elektrické energie:  
 odběr turniketu dávkování do výměníku:  
 odběr ventilátoru filtru „na 58m“:

$M = 78\%$   
 $Opv_A = 1008 \text{ A}$   
 $OpvK_2 = 984 \text{ kWh}$   
 $E_1 = 2,083 \text{ Kč/kWh}$   
 $Otd = 3,5 \text{ kWh}$   
 $Ovf = 19,5 \text{ kWh}$



Náklady na kWh po odloučení dop. množství vzduchu:

$$NA_2 = (OpvK_2 + Otd + Ov_f) \times E_1 \quad (2)$$

$$NA_2 = (984 + 3,5 + 19,5) \times 4,6$$

$$NA_2 = 2097,581 \text{ Kč/hod} \times 24 = 50\,342 \text{ Kč/den} \times 330 = \mathbf{16\,612\,842 \text{ Kč/rok}}$$

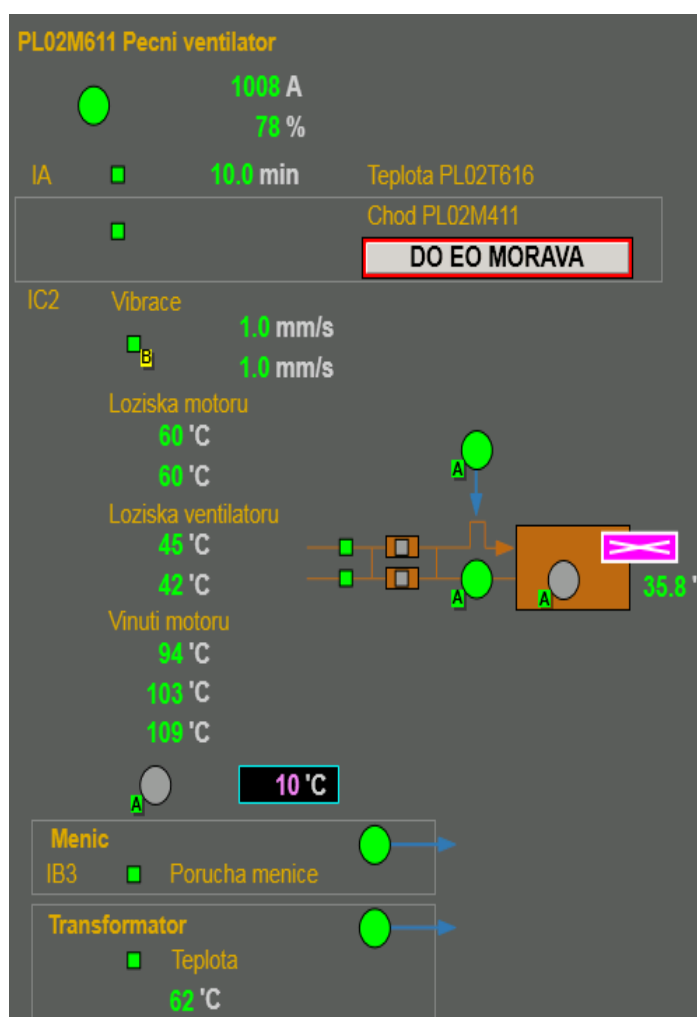
Po snížení otáček pecního ventilátoru, které bylo provedeno po odloučení dopravního množství vzduchu, jsou náklady na provozování pecního ventilátoru „jen“ cca 17 000 000 Kč.

Úspora na platbě za elektrickou energii:

$$U = NA_1 - NA_2 \quad (3)$$

$$U = 5299,2 - 4632,2$$

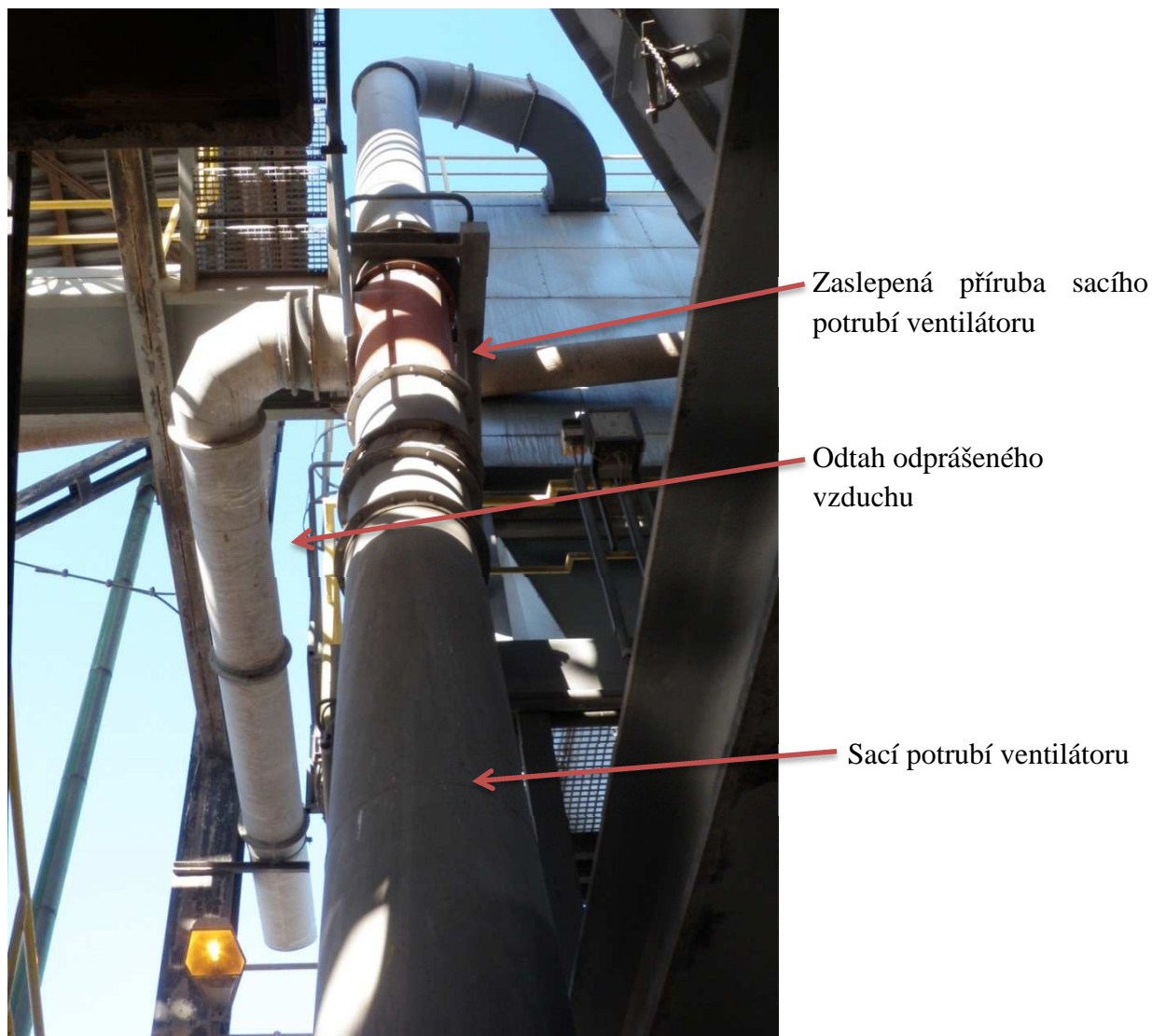
$$U = 302,035 \text{ Kč/hod} \times 24 = 7\,249 \text{ Kč/den} \times 330 = \mathbf{2\,392\,117 \text{ Kč/rok}}$$



Obr. 47 Výpočtové schéma pro pecní ventilátor po odloučení vzduchu [9]

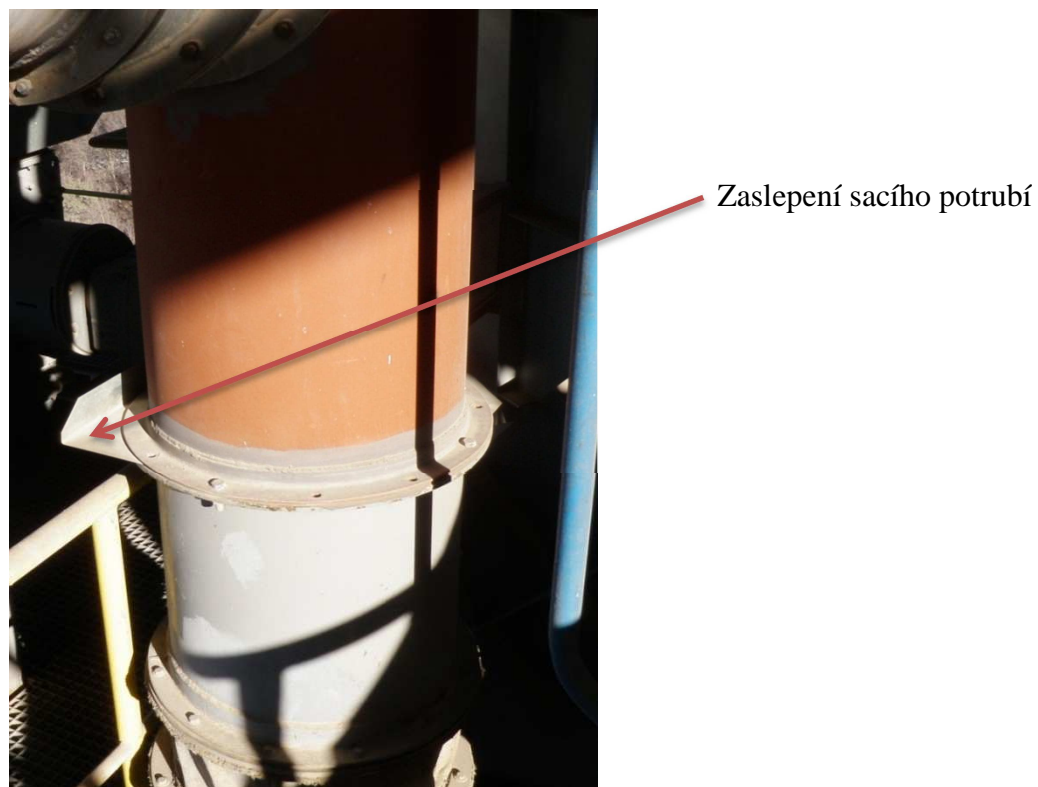
### 5.3.2 Úspora za elektrickou energii bez použití ventilátoru filtru „na 58m“

Vzhledem k příznivým vzduchotechnickým poměrům v systému výměníku RPS byla provozními testy vyzkoušena možnost odstavení ventilátoru. Na základě příznivých podtlaků v systému dochází k odsávání (odprášení) surovinové moučky pomocí hadicového filtru bez provozu ventilátoru. Sací potrubí od ventilátoru bylo „zaslepeno“ (viz. obr. 48).



Obr. 48 Vzduchotechnické potrubí filtru „na 58m“

Na obr. 49 vidíme detail zaslepení sacího potrubí ventilátoru filtru „na 58m“



Obr. 49 Zaslepení sacího potrubí ventilátoru filtru „na 58m“

Stav po odstavení ventilátoru:

nastavení měniče pecního ventilátoru:  
odběr pecního ventilátoru v Ampérech:  
odběr pecního ventilátoru v kWh:  
použitá cena elektrické energie:  
odběr turniketu dávkování do výměníku:  
odběr ventilátoru filtru „na 58m“:

$M = 78\%$   
 $Opv_A = 1008 \text{ A}$   
 $OpvK_2 = 984 \text{ kWh}$   
 $E_1 = 2,083 \text{ Kč/kWh}$   
 $Otd = 3,5 \text{ kWh}$   
 $Ovf = 0 \text{ kWh}$

Náklady na kWh po odstavení ventilátoru:

$$NA_3 = (OpvK_2 + Otd + Ovf) \times E_1 \quad (4)$$

$$NA_3 = (984 + 3,5 + 0) \times 4,6$$

$$NA_3 = 2056,963 \text{ Kč/hod} \times 24 = 49\,367 \text{ Kč/den} \times 330 = \mathbf{16\,291\,143 \text{ Kč/rok}}$$

Úspora na platbě za elektrickou energii:

$$U = NA_1 - NA_3 \quad (5)$$

$$U = 5299,2 - 4542,5$$

$$U = 342,65 \text{ Kč/hod} \times 24 = 8\,224 \text{ Kč/den} \times 330 = \mathbf{2\,713\,816 \text{ Kč/rok}}$$

### 5.3.3 Úspora na černém uhlí

Průtok vzduchu:

$$\dot{V}_{AIR} = 3700 \text{ m}_N^3$$

Teplota vzduchu:

$$t_{AIR} = 100^\circ\text{C}$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu:

$$cp_{AIR} = 1,3 \text{ kJ/m}_N^3\text{K}$$

Entalpie vzduchu:

$$h_{AIR} = 361,7 \text{ MJ/h}$$

Teplota okolí:

$$t_o = 25^\circ\text{C}$$

Výpočet měrné tepelné kapacity vzduchu:

$$cp_{AIR} = 1,297 + 5,75 \times 10^{-5} \times t_{AIR} + 8,06 \times 10^{-8} \times t_{AIR}^2 - 2,86 \times 10^{-11} \times t_{AIR}^3 \quad (6)$$

$$cp_{AIR} = 1,297 + 5,75 \times 10^{-5} \times 100 + 8,06 \times 10^{-8} \times 100^2 - 2,86 \times 10^{-11} \times 100^3$$

$$cp_{AIR} = 1,3 \text{ kJ/m}_N^3$$

Výpočet entalpie vzduchu:

$$h_{AIR} = \dot{V}_{AIR} \times cp_{AIR} \times (t_{AIR} - t_o)/1000$$

$$h_{AIR} = 3700 \times 1,3 \times (100 - 25)/1000$$

$$h_{AIR} = 361,7 \text{ MJ/h}$$

Výpočet měrných tepelných kapacit spalin:

Teplota nad druhým cyklonem výměníku:  $t_2 = 590^\circ\text{C}$

$$cp_{CO2} = 1,633 + 9,631 \times 10^{-4} \times t_2 - 4,606 \times 10^{-7} \times t_2^2 + 8,90 \times 10^{-11} \times t_2^3 \quad (7)$$

$$cp_{CO2} = 1,633 + 9,631 \times 10^{-4} \times 590 - 4,606 \times 10^{-7} \times 590^2 + 8,90 \times 10^{-11} \times 590^3$$

$$cp_{CO2} = 2,059 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

$$cp_{H_2O} = 1,489 + 9,52 \times 10^{-5} \times t_2 + 2,021 \times 10^{-7} \times t_2^2 - 7,35 \times 10^{-11} \times t_2^3 \quad (8)$$

$$cp_{H_2O} = 1,489 + 9,52 \times 10^{-5} \times 590 + 2,021 \times 10^{-7} \times 590^2 - 7,35 \times 10^{-11} \times 590^3$$

$$cp_{H_2O} = 1,631 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

$$cp_{N_2} = 1,301 + 3,05 \times 10^{-5} \times t_2 + 9,65 \times 10^{-8} \times t_2^2 - 3,22 \times 10^{-11} \times t_2^3 \quad (9)$$

$$cp_{N_2} = 1,301 + 3,05 \times 10^{-5} \times 590 + 9,65 \times 10^{-8} \times 590^2 - 3,22 \times 10^{-11} \times 590^3$$

$$cp_{N_2} = 1,346 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

$$cp_{O_2} = 1,304 + 1,916 \times 10^{-4} \times t_2 - 9,4 \times 10^{-9} \times t_2^2 - 1,01 \times 10^{-11} \times t_2^3 \quad (10)$$

$$cp_{O_2} = 1,304 + 1,916 \times 10^{-4} \times 590 - 9,4 \times 10^{-9} \times 590^2 - 1,01 \times 10^{-11} \times 590^3$$

$$cp_{O_2} = 1,412 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

Výpočet celkové měrné tepelné kapacity spalin:

Tabulka č. 6 Uvedené hodnoty složení spalin

Legenda	t/hod	% hm.	% obj.
CO <sub>2</sub>	69,32	41,08	29,92
H <sub>2</sub> O	8,00	4,74	8,44
SO <sub>2</sub>	0,15	0,09	0,04
N <sub>2</sub>	87,47	51,83	59,32
O <sub>2</sub>	3,82	2,27	2,27
Σ	168,76		

Hmotnostní průtok oxidu uhličitého:  $\dot{m}_{CO_2} = 69,32$

Hmotnostní průtok vody:  $\dot{m}_{H_2O} = 8,00$

Hmotnostní průtok dusíku:  $\dot{m}_{N_2} = 87,47$

Hmotnostní průtok kyslíku:  $\dot{m}_{O_2} = 3,82$

Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého:  $x_{CO_2} = 41,08$

Hmotnostní koncentrace vody:  $x_{H_2O} = 4,74$

Hmotnostní koncentrace dusíku:  $x_{N_2} = 51,83$

Hmotnostní koncentrace kyslíku:  $x_{O_2} = 2,27$

Objemová koncentrace oxidu uhličitého:  $v_{CO_2} = 29,92$

Objemová koncentrace vody:  $v_{H_2O} = 8,44$

Objemová koncentrace dusíku:  $v_{N_2} = 59,32$

Objemová koncentrace kyslíku:  $v_{O_2} = 59,32$



$$c_{p_c} = \left( \frac{V_{CO_2}}{100 \times c_{p,CO_2}} \right) + \left( \frac{V_{H_2O}}{100 \times c_{p,H_2O}} \right) + \left( \frac{V_{N_2}}{100 \times c_{p,N_2}} \right) + \left( \frac{V_{O_2}}{100 \times c_{p,O_2}} \right) \quad (11)$$

$$c_{p_c} = \left( \frac{29,92}{100 \times 2,059} \right) + \left( \frac{8,44}{100 \times 1,631} \right) + \left( \frac{59,32}{100 \times 1,346} \right) + \left( \frac{59,32}{100 \times 1,412} \right)$$

$$c_{p_c} = 1,584 \text{ kJ/m}^3 \text{K}$$

Výpočet entalpie spalín:

$$h_{\text{spalín}} = V_{\text{AIR}} \times c_{p_c} \times \left( \frac{t_2 - t_0}{100} \right) \quad (12)$$

$$h_{\text{spalín}} = 3700 \times 1,584 \times \left( \frac{590 - 25}{100} \right)$$

$$h_{\text{spalín}} = 3312 \text{ MJ/h}$$

Výpočet ztráty na teple před odloučením vzduchu:

$$\text{Množství slínku vyrobeno za hodinu:} \quad \dot{m}_{\text{slínku}} = 81,10 \text{ t/h}$$

$$Q_z = h_{\text{spalín}} - h_{\text{AIR}} \quad (13)$$

$$Q_z = 3312 - 361,7$$

$$Q_z = 2950,3 \text{ MJ/h}$$

Přepočet ztráty na teple na kJ/kg

$$\frac{Q_z}{\dot{m}_{\text{slínku}} \times 1000} = \frac{2950,3}{81,10 \times 1000} = 0,04 \text{ GJ/t slínku} = 40 \text{ kJ/kg slínku} \quad (14)$$

Z výpočtu vyplývá, že tepelná ztráta před odloučením dopravního množství vzduchu při teplotě 100°C činí 40 kJ/kg slínku. Tuhle hodnotu nyní použijeme pro výpočet úspory na černém uhlí.

Výpočet úspory na černém uhlí:

Z rovnice (13) respektive (14) vyplývá, že po odloučení dopravního množství vzduchu o teplotě 100°C došlo k úspoře 40 kJ/kg slínku.

$$\text{Plánovaná roční výroba slínku:} \quad m_{\text{slínku}} = 608\,000 \text{ t}$$

Úspora na teple:

$$U_Q = Q_z \times m_{\text{slínku}} \quad (15)$$

$$U_Q = 40 \times 608\,000$$

$$U_Q = 24\,320\,000 \text{ MJ} = 24\,320 \text{ GJ}$$

Úspora na černém uhlí:

Cena černého uhlí:  $c_{\text{ču}} = 4700 \text{ Kč/t}$   
Výhřevnost černého uhlí:  $\text{LHV} = 30 \text{ GJ/t}$

$$U_u = \left( \frac{U_Q}{\text{LHV}} \right) \times c_{\text{ču}} \quad (16)$$

$$U_u = \left( \frac{24\,320}{30} \right) \times 4700$$

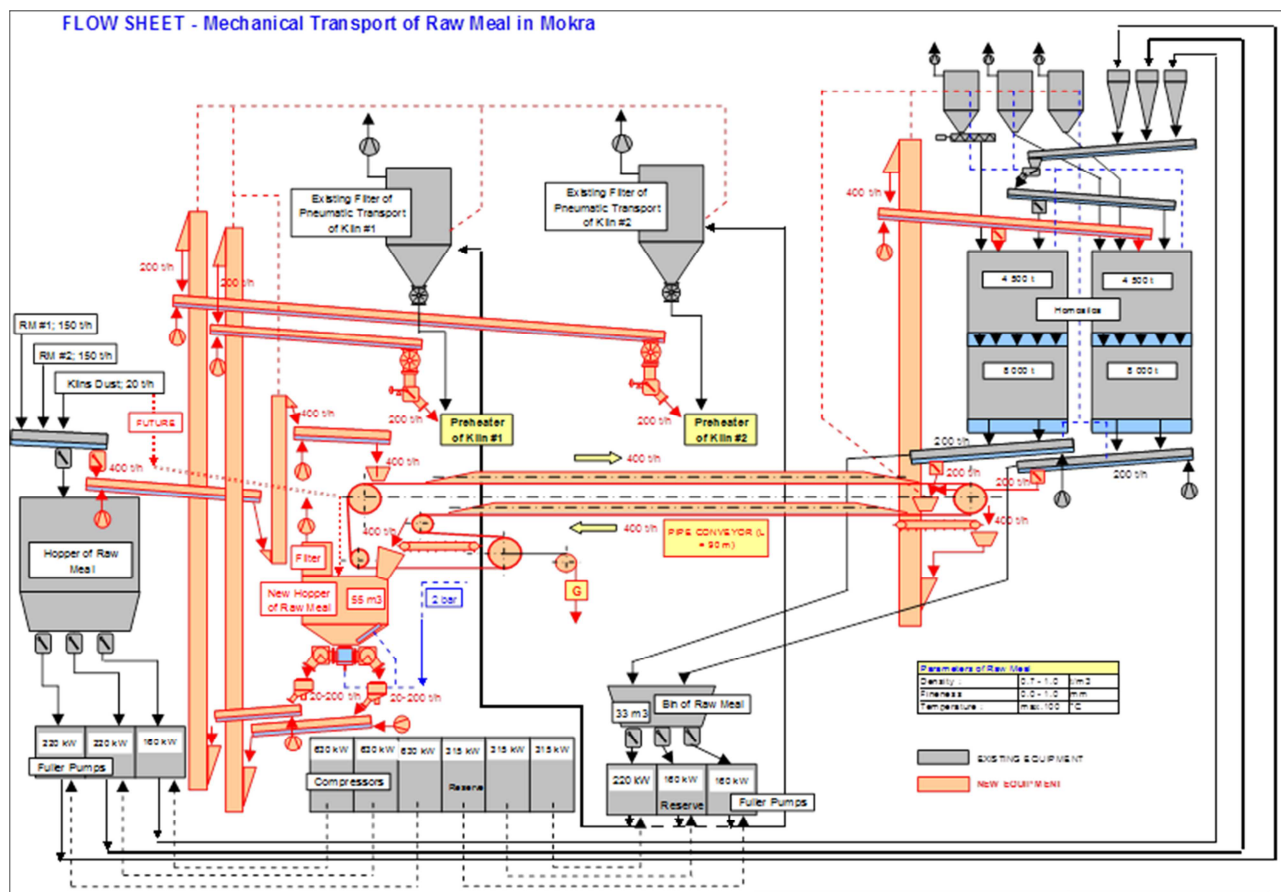
$$U_u = 3\,810\,133 \text{ Kč/rok}$$

#### 5.4 Možnost náhrady pneumatické dopravy surovinové moučky do výměníku a homogenizačních sil dopravou mechanickou

Pneumatická doprava surovinové moučky je v dnešní době při vysoké ceně elektrické energie značným přežitkem a zatěžuje výrobu cementu velmi značnými provozními náklady. Cementárna Mokrá v posledních letech pracuje na studiích, jak tyto náklady minimalizovat. Jediným známým řešením jak nahradit pneumatickou dopravu je náhrada dopravou mechanickou. Tato změna vyžaduje značné prvotní investiční náklady. Poslední studie je z roku 2011, kdy doprava surovinové moučky z homogenizačních sil do výměníku byla spojena s dopravou surovinové moučky ze surovinových mlýnů do homogenizačních sil. Společná zařízení obou doprav má snížit dobu návratnosti investice.

Na obr. 50 vidíme stávající řešení, které je provedeno v šedých barvách a nové řešení je do schéma doplněno v barvách oranžových. Jedná se o velmi významnou investici, jejíž provedení si vyžádá téměř dva roky náročných prací. Vše by muselo probíhat současně s provozující linkou za provozu. Samotné připojení technologie a přejetí na mechanickou dopravu nesmí omezit provoz linky na více jak 28 dní, neboť by došlo k dalším finančním ztrátám, které by prodloužily návratnost investice. Těchto 28 dní musí souviset s takzvanou generální opravou, která v cementárně probíhá každý rok v měsících lednu a únoru (nejnižší odbyt cementu v roce).

Poslední studie, která oproti předchozím studiím použila novinku tzv. „pipe dopravníky“ snížila náklady investice ze 120 mil. Kč na 85 mil. Kč. Tyto náklady v odhadech výroby znamenají návratnost minimálně 7 let, což pro takto vysoké investice je stále vysoká doba návratnosti. V současné době krize, kdy stavebnictví je ve velmi těžké situaci, je provedení takovéto investice velmi riskantní. Kapacita výroby v cementárně Mokrá je 1,5 mil. tun cementu ročně a v současné době vyrábí 50% svých možností. Jakmile se zvýší výroba cementu, bude i návratnost investice výrazně pozitivnější a investice se bude realizovat.



Obr. 50 Mechanická doprava surovinové moučky [9]

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na provedení technicko-ekonomické analýzy vlivu odloučení dopravního množství vzduchu surovinové moučky na ekonomiku výroby slínku resp. cementu v konkrétní cementářské výrobě, v Cementárně Mokrá. Analýza je provedena na základě detailního poznání a rozboru funkce jednotlivých částí technologie výroby cementu, které jsou odloučením dopravního vzduchu surovinové moučky ovlivněny, tj. především systém dávkování a předehřevu surovinové moučky. Výsledky provedené analýzy ukazují významný efekt (dopad) odloučení dopravního vzduchu na ekonomiku provozu.

Vypočteny byly úspory za elektrickou energii a za teplo. Před odloučením dopravního množství vzduchu surovinové moučky byly náklady na provozování pecního ventilátoru značným nákladem při výrobě slínku (19 004 959 Kč/rok). Po snížení otáček pecního ventilátoru, které bylo provedeno po odloučení dopravního množství vzduchu, jsou náklady na provozování pecního ventilátoru „jen“ 16 612 842 Kč/rok a tedy úspora za elektrickou energii 2 392 117 Kč/rok. Vzhledem k příznivým vzduchotechnickým poměrům v systému výměníku RPS byla dále provozními testy vyzkoušena možnost odstavení ventilátoru filtru „na 58 m“. Náklady na jeho provoz byly 16 291 143 Kč/rok. Po odstavení činí úspora na elektrické energii 2 713 816 Kč/rok. Dále z výpočtu úspory na černém uhlí vyplývá, že po odloučení dopravního množství vzduchu o teplotě 100°C došlo k úspoře 40 kJ/kg slínku a tedy úspoře 24 320 GJ tepla. Při znalosti ceny a výhřevnosti černého uhlí dostaneme úsporu na černém uhlí 3 810 133 Kč/rok. Při výpočtech nejsou zohledněny náklady na údržbu nového zařízení (např. výměny hadic ve filtru po cca pětileté životnosti). Nejsou zohledněny úspory na ostatním zařízení (méně spalín přes kouřový ventilátor, menší vibrace, menší opotřebení atd.). Přes všechny uvedené následné zásahy na technologickém zařízení byla investiční akce vyhodnocena jako velmi pozitivní s rychlým návratem vynaložených finančních prostředků.

I přes tyto úspory je doprava surovinové moučky pomocí dopravního vzduchu velmi nákladná na elektrickou energii. Studie zabývající se mechanickou dopravou pomocí korečkového elevátoru by byla ekonomicky výhodnější. Šedesátimetrový elevátor (případně dva třicetimetrové elevátory) je velmi nákladnou investicí, kterou se v Mokré nyní zabývají. Její realizace je však z finančních důvodů prozatím odložena.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HEWITT G., SHIRES G. and BOTT T. (1994) *Process Heat Transfer*, CRC Press, LLC, Boca Raton, FL, USA.
2. commons.wikimedia.org [online], 11-6-2009, [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Heat\_exchanger\_diagrams>
3. olaer.cz [online], 14-01-2010, [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://olaer.cz/cz-produkty-prehled/cz-produkty-chladice-3/cz-prod-kuehl-rohrbund.htm>
4. powerlab.fsb.hr [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://powerlab.fsb.hr/osnoveenergetike/wiki/index.php?title=Slika:Ter14.jpg>
5. Úřad pro vynálezy a objevy: Popis vynálezu k autorskému osvědčení. MICHÁLEK, Zdeněk, Jaroslav POSPÍŠIL, Alois SEHNÁLEK a Josef ŽAJDLÍK. [online]. 15.4.1984. Přerov, 15.8.1987 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/240/240590.pdf>
6. Výměníky a kalcinátory. PSP ENGINEERING,a.s. [online]. Přerov, 2005 [cit. 2013-04-22].
7. BCB PLZEŇ spol. s.r.o.: Výměníky pro přenos tepla. *Webová stránka* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.bcb-plzen.eu/alfalaval/pajene.htm>
8. ČESKOMORAVSKÝ CEMENT - ZÁVOD MOKRÁ. *Propagační materiály cementárna Mokrý.* Mokrý u Brna, 2013.
9. ČESKOMORAVSKÝ CEMENT - ZÁVOD MOKRÁ. *Pracovní podklady pro řešení diplomové práce.* Mokrý u Brna, 2013.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
M	nastavení měniče pecního ventilátoru	[%]
Opv <sub>A</sub>	odběr pecního ventilátoru v ampérech	[A]
OpvK <sub>1</sub>	odběr pecního ventilátoru v kilowatthodinách před odloučením	[kWh]
E <sub>1</sub>	použitá cena elektrické energie	[Kč]
NA <sub>1</sub>	náklady na kWh před odloučením dop. množství vzduchu	[Kč/rok]
OpvK <sub>2</sub>	odběr pecního ventilátoru v kilowatthodinách po odloučení	[kWh]
Otd	odběr turniketu dávkování do výměníku	[kWh]
Ovf	odběr ventilátoru filtru „na 58m“:	[kWh]
NA <sub>2</sub>	náklady na kWh po odloučením dop. množství vzduchu	[Kč/rok]
U	úspora na platbě za elektrickou energii	[Kč/rok]
$\dot{V}_{AIR}$	průtok vzduchu	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
t <sub>AIR</sub>	teplota vzduchu	[°C]
cp <sub>AIR</sub>	měrná tepelná kapacita vzduchu	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
h <sub>AIR</sub>	entalpie vzduchu	[MJ/h]
t <sub>o</sub>	teplota okolí	[°C]
cp <sub>CO2</sub>	měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
cp <sub>H2O</sub>	měrná tepelná kapacita oxidu vody	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
cp <sub>N2</sub>	měrná tepelná kapacita oxidu dusíku	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
cp <sub>O2</sub>	měrná tepelná kapacita oxidu kyslíku	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
$\dot{m}_{CO2}$	hmotnostní průtok oxidu uhličitého	[t/hod]
$\dot{m}_{H2O}$	hmotnostní průtok vody	[t/hod]
$\dot{m}_{N2}$	hmotnostní průtok dusíku	[t/hod]
$\dot{m}_{O2}$	hmotnostní průtok kyslíku	[t/hod]
x <sub>CO2</sub>	hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého	[% hm.]
x <sub>H2O</sub>	hmotnostní koncentrace vody	[% hm.]
x <sub>N2</sub>	hmotnostní koncentrace dusíku	[% hm.]
x <sub>O2</sub>	hmotnostní koncentrace kyslíku	[% hm.]
v <sub>CO2</sub>	objemová koncentrace oxidu uhličitého	[% obj.]
v <sub>H2O</sub>	objemová koncentrace vody	[% obj.]
v <sub>N2</sub>	objemová koncentrace dusíku	[% obj.]
v <sub>O2</sub>	objemová koncentrace kyslíku	[% obj.]
cp <sub>c</sub>	celková měrná tepelná kapacita spalin	[kJ/ m <sup>3</sup> <sub>N</sub> K]
h <sub>spalin</sub>	entalpie spalin	[MJ/h]
Q <sub>z</sub>	ztráta na teple před odloučením vzduchu	[MJ/h]
$\dot{m}_{slínku}$	množství slínku vyrobeno za hodinu	[t/h]
m <sub>slínku</sub>	plánovaná roční výroba slínku	[t]
U <sub>Q</sub>	úspora na teple	[GJ]
U <sub>u</sub>	úspora na černém uhlí	[Kč/rok]

## **SEZNAM PŘÍLOH**

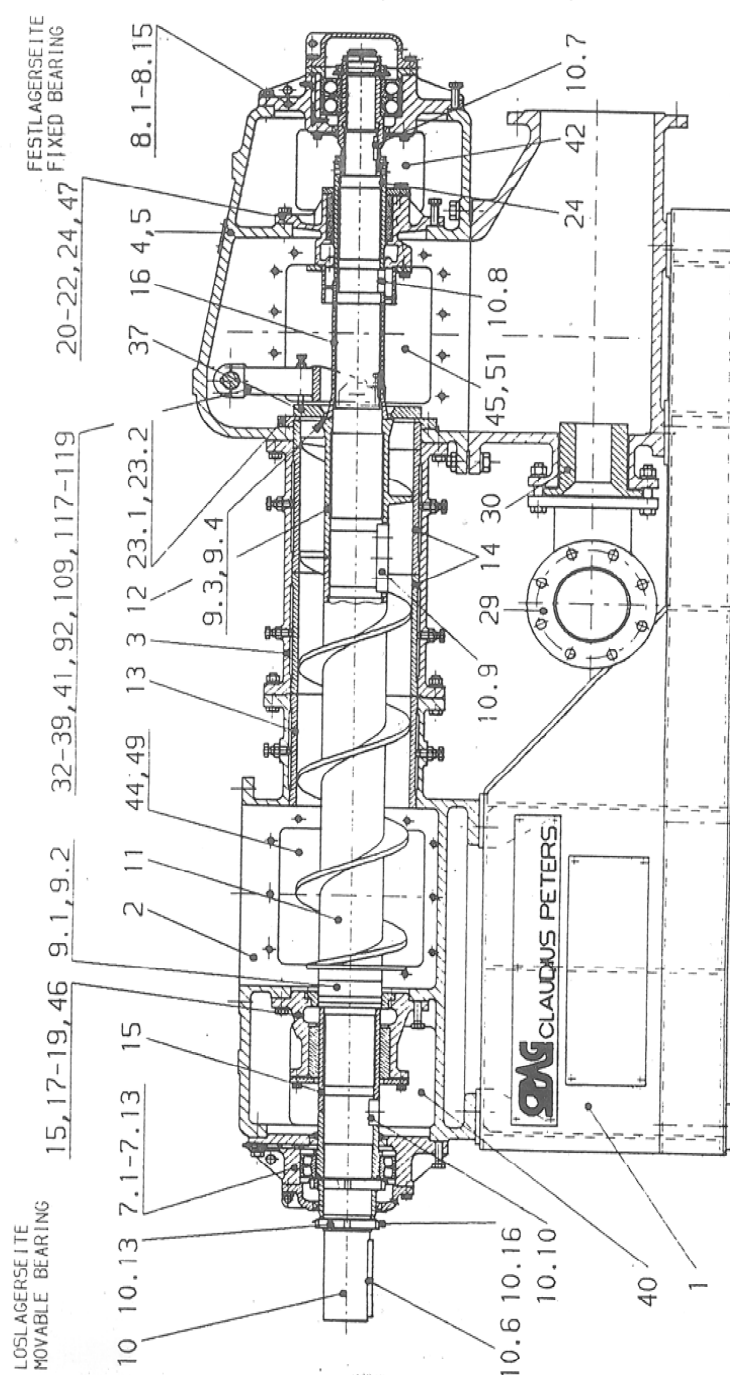
**Příloha č.1** Fullerovo čerpadlo [9]

**Příloha č.2** Pecní linka včetně roštového chladiče.[9]

SFO

**CLAUDIUS PETERS**

PETERS-PUMPE TYP X  
PETERS PUMP TYPE X



LOSLAGERSEITE  
MOVABLE BEARING

FESTLAGERSEITE  
FIXED BEARING

ERSATZTEILZEICHNUNG: 309:0010.0021A/02.ED  
SPARE PARTS DRAWING, SEITE 1 VON 6  
DESSIN DE PIÉCES DE RECHANGE, PAGE 1 OF/DE 6  
DIBUJO DE REPUESTAS.

BEI ERSATZTEIL-ANFRAGEN ODER -BESTELLUNGEN BITTE AUFTRAGSNUMMER, BEZEICHNUNG UND KÜRZEL DIESER DRUCKSCHRIFT, SOWIE DIE NACHFOLGENDEN ZEICHNUNGS- UND KÜRZELNANGABEN MITFÜHREN UND ALLE DATEN DES TYP-SCHLÜSSES, IN CAS DE DEMANDES OU DE COMMANDES PORTANT SUR DES PIÉCES DE RECHANGE, VEUILLEZ INDICUER S'IL VOUS PLAIT LE NO. DE COM. LA DÉSIGNATION ET LE NO. DU PRÉSENT INSCRIBE. LA DÉSIGNATION ET LE NO. DES EN CAS DE DEMANDES OU DE COMMANDES PORTANT SUR DES PIÉCES DE RECHANGE, VEUILLEZ INDICUER S'IL VOUS PLAIT LE NO. DE COM. LA DÉSIGNATION ET LE NO. DU PRÉSENT INSCRIBE. LA DÉSIGNATION ET LE NO. DES

## Příloha č.2 Pecní linka včetně roštového chladiče

